

Investigaciones Geográficas

Instituto Interuniversitario de Geografía

81



INVESTIGACIONES **GEOGRÁFICAS**

La publicación de este número ha sido posible gracias a la obtención de una ayuda otorgada por el Vicerrectorado de Investigación y Transferencia de Conocimiento de la Universidad de Alicante.

EDITORIAL

Instituto Interuniversitario de Geografía. Universidad de Alicante
Carretera de San Vicente del Raspeig, s/n. 03690, San Vicente del Raspeig - Alicante (España)
Tel.: (34) 965903400 Ext. 3380 – Fax: (34) 965909485
investigacionesgeograficas@ua.es – www.investigacionesgeograficas.com

ISSN (hasta 2012): 0213–4691 - ISSN (electrónico): 1989–9890
Depósito legal: A-52-1983 - DOI: <https://doi.org/10.14198/INGEO>



Los trabajos se publican bajo una licencia [Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), salvo que se indique lo contrario.

© la autoría

Las opiniones reflejadas en los contenidos publicados en *Investigaciones Geográficas* son responsabilidad exclusiva de sus autores/as.

Índice

Index

ARTÍCULOS | ARTICLES

Methodology of data generation and calculation of erosion rates applied to littoral areas: Evolution of the Andalusian shoreline on exposed beaches during the 21st century (2001-2019)	9
<i>Antonio Prieto Campos, José Ojeda Zújar</i>	
Landscape through graphic representation: Augmented Reality as a tool for interpretation	33
<i>Felipe Fernández García, Daniel Herrera Arenas, Juan Sevilla Álvarez</i>	
Disparidad entre cartografías oficiales de peligrosidad y eventos reales: análisis de posibles causas. Estudio de caso en el río Campanillas (Málaga).....	51
<i>Antonio Gallegos Reina, José María Orellana Macías, María Jesús Perles Roselló</i>	
Análisis de las conductas de movilidad de los estudiantes de Geografía e Historia de la Universidad Pablo de Olavide	71
<i>Andreas Christian Hassold, Antonio Gavira Narváez</i>	
Análisis de las imágenes sobre riesgos naturales en los manuales escolares de Ciencias Sociales (España). Catastrofismo y realidad territorial	93
<i>Álvaro-Francisco Morote, Jorge Olcina</i>	
Apuntes de la ecología fluvial de la cuenca del Alto Guadalupe en un contexto de conflictividad ambiental y crisis climática.....	109
<i>Luis del Romero Renau, Núria Esteve Roda, Antonio Valera Lozano</i>	
El patrimonio geomorfológico del Macizo de Peña Ubiña: propuesta de lugares de interés geomorfológico en un espacio natural protegido	131
<i>David Gallinar Cañedo, Jesús Ruiz Fernández, Cristina García Hernández, Mirella Ochoa Álvarez</i>	
Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador	155
<i>Paúl Arias-Muñoz, Miguel Ángel Saz, Severino Escolano</i>	
Análisis de la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la Patagonia árida bajo distintos escenarios.....	181
<i>Valeria Aramayo, Marcelo Nosetto, María Victoria Cremona</i>	
Incorporación de factores socioeconómicos al análisis de vulnerabilidad del riesgo por inundación en vías usando un modelo geoespacial	201
<i>Alejandro Parra Saad, Mayerling Sanabria Buitrago, Ricardo Sanabria, Karol Natalia Piñeros Dueñas</i>	
Impact of climate and demographic changes on the vegetation of the M'goun Geopark UNESCO of Morocco (1984-2021)	225
<i>Gharnit Youssef, Moujane Abdelaziz, Outourakht Aboubakre, Aziz Hasib, Abdelali Boulli</i>	

ARTÍCULOS
ARTICLES

Methodology of data generation and calculation of erosion rates applied to littoral areas: Evolution of the Andalusian shoreline on exposed beaches during the 21st century (2001-2019)

Metodología de levantamiento de datos y cálculo de las tasas de erosión en el litoral: la evolución de la línea de costa andaluza en las playas expuestas para el s.XXI (2001-2019)

AUTHORSHIP

Antonio Prieto Campos 

Universidad de Sevilla, España.

José Ojeda Zújar 

Universidad de Sevilla, España.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25242>

CITATION

Prieto Campos, A. & Ojeda Zújar, J. (2024). Methodology of data generation and calculation of erosion rates applied to littoral areas: Evolution of the Andalusian shoreline on exposed beaches during the 21st century (2001-2019). *Investigaciones Geográficas*, (81), 9-31. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25242>

CORRESPONDENCE

Antonio Prieto Campos (pcampos@us.es)

HISTORY

Received: 23 May 2023
Accepted: 12 December 2023
Published: 26 January 2024

TERMS

© Antonio Prieto Campos and José Ojeda Zújar

 This work is published under a license [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Abstract

This paper describes the methodology used for the data collection and calculation of erosion rates and presents the recent results for the period 2001-2019 for all the beaches of the Andalusian shoreline. This period is divided into two subperiods (2001-2011 and 2001-2019) to detect possible trend changes during the study years. The proxy corresponding to the internal limit of the backshore has been used, which is very useful for medium to long-term coastal erosion rates. The results show the rates calculated for this proxy, which reveal a high presence of artificially stabilised sectors where the inward migration of the shoreline associated with it is hindered, together with an intensification of the retreat rates in natural sections. Similarly, there is a clear differentiation between a relatively dynamic Atlantic façade with a higher percentage of erosive sectors and a Mediterranean façade highly conditioned by anthropic presence, with a lower percentage but a higher intensity in their values.

Keywords: shoreline; exposed beaches; evolution; erosion rates; 21st century; Andalusia.

Resumen

El presente trabajo muestra la metodología seguida para el levantamiento de datos y el cálculo de tasas de erosión, así como el resultado de las mismas durante el período reciente de 2001-2019 para la totalidad de las playas del frente litoral de Andalucía. Dicho período es dividido, a su vez, en dos subperíodos (2001-2011 y 2001-2019), con el objetivo de detectar posibles cambios de tendencia durante los años de estudio. Se ha utilizado el indicador (proxy) correspondiente al límite interno de la playa seca (backshore), de gran utilidad para cálculos de tasas a medio-largo plazo. Los resultados recogen las tasas calculadas para este indicador, las cuales muestran una elevada presencia de sectores estabilizados artificialmente por la presencia de infraestructuras longitudinales que dificultan la migración hacia el interior de la línea de costa asociada al mismo, así como una intensificación del fenómeno erosivo en aquellos tramos libres de infraestructuras. De igual forma, se constata una clara diferenciación entre una fachada atlántica relativamente dinámica con mayor porcentaje tramos erosivos y una fachada

mediterránea muy condicionada por su presión antrópica, que presenta un menor porcentaje, pero una mayor intensidad en los valores negativos de las tasas.

Palabras clave: línea de costa; playas expuestas; evolución; tasas de erosión; s.XXI; Andalucía.

1. Introduction

1.1. State of the question and objectives

The coastal area is considered as being one of the principal natural transition zones, due to its high ecological and social value that enables it to provide a large number of ecosystemic services, such as climate regulation, the preservation of natural ecosystems, leisure opportunities, etc. (Georgiou & Turner, 2008). All of these factors make the coastal strip a space that is highly sensitive to the pressures exercised on it by the increasing human presence in littoral areas. In this respect, coastal erosion is one of the principal processes that has been intensified by this pressure. According to Mentaschi et al. (2018), approximately 2.8 million hectares of coastline have been eroded over the past 30 years on a global scale, approximately twice the area gained by accumulative processes.

Andalusia, the area of study for this article, with more than 900 km of coastline, is one of the most highly demanded tourist destinations on a national and international level, which has led to an exponential increase in the anthropic pressure on the shoreline. The anthropic pressure exerted on extensive sectors of the Andalusian coast, with the Costa del Sol as a paradigm of the sun and beach tourism model and the resulting urbanisation of the area, has led to the mass occupation of land that is vitally important for the coastal systems. The definitive sealing of the areas close to the coast alters the necessary adjustments of the transversal beach profile, fostering the loss of vital sedimentological resources for the natural regeneration of the dune system and, therefore, of the beach over time.

On the other hand, coastal erosion is closely related to the concept of sedimentary balance, understood as the net volume of sediments transported in a specific area during a certain period of time and to the coastal dynamics that transport them, generating processes of erosion or accumulation (Komar, 2018). The movement of sedimentary material on the beaches is, therefore, a volumetric phenomenon, and its comprehensive study would require data sources that provide tri-dimensional data of the whole transversal profile of the beaches (digital terrain models, LiDAR data, etc.). Due to the difficulty involved in obtaining these data retrospectively in medium to long term studies, it is more common to use the changes in the shoreline to calculate different proxies in which their oscillations (advances or retreats) are quantified. There are many studies that use these proxies in the international scientific literature (Esteves et al., 2009; Moore et al., 2006), in a national scale (Di Paola et al., 2020; Pérez-Alberti et al., 2013) and for the coast of Andalusia (Gracia et al., 2005; Molina et al., 2019).

The overall objective of this study is to show the results of the evolution of the shoreline for all of the exposed beaches of the autonomous region of Andalusia, generically expressed as erosion/accumulation rates (in this case understood as rates of retreat / advance of the shoreline) through the proxy that we have considered to be most appropriate, taking as an overall time reference the period 2001-2019. In turn, the following specific objectives are also sought:

- To present the methodology used and the results obtained with the chosen proxy (internal limit of the backshore) to calculate the erosion/accumulation rates for all of the beaches of the exposed shoreline of Andalusia.
- To describe, quantify and compare the results obtained both on a statistical and spatial level in the two coastal façades of the Andalusian coastline (Atlantic and Mediterranean).
- To examine and quantify the possible trend changes of the different coastal sectors by dividing the overall period of study into two subperiods of a similar duration (2001-2011 and 2011-2019). The idea is to evaluate and quantify the state (erosive, accumulative or stable) of each sector in the initial period and to determine to which state it has evolved (to erosive, accumulative or stable states) in the final period.
- To present the results in an open access web client (geoviewer and dashboard) as the only way of spatially representing and interactively exploring the data generated on a detailed scale, given the extension of the area of study.

In order to fulfil these general and specific objectives, this study presents the results on a descriptive, statistical and spatial level for all of the exposed beaches of Andalusia through calculating rates. However,

it only provides a brief interpretation of them in the cases that are most persistent over time (due to the extension of the area of study and the complexity of the erosive processes on a detailed scale), with the final objective of identifying the sectors that experience the most continuous movement of their shorelines (both retreats and advances) both on the Atlantic and Mediterranean façades due to their greater exposure to coastal erosion.

1.2. Theoretical framework of sources and shoreline proxies

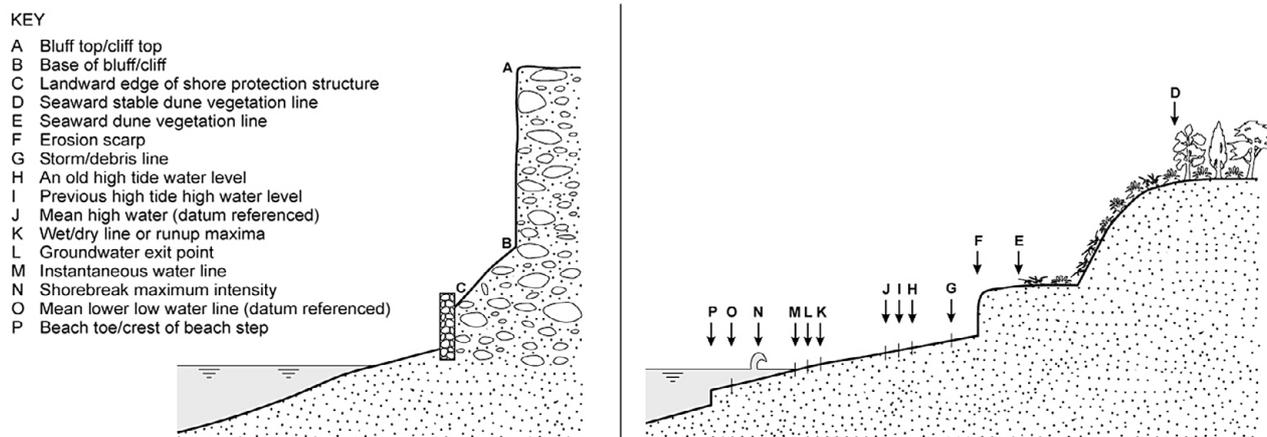
As previously mentioned, coastal erosion is a volumetric phenomenon that needs tri-dimensional data sources for analysing the behaviour of the process as a whole, in the case of beaches for their entire active transversal profile, providing methodological solidity to the results of the studies obtained.

However, the range of available data sources that include the tri-dimensional variable is small and has only recently been incorporated into general public use (Ojeda-Zújar, 2000; Prieto-Campos, 2017). Sources that enable the generation of precise altimetric data are required for both the emerged and submerged part of the beaches. Given the extension of the area of study, these sources are scarce and very costly. The use of topographic profiles of the transversal beach profile (with total station or GPS) is a possible data source for small areas and, even so, it is difficult to reach the wave closure depth on the active transversal profile. The airborne LiDAR (*Light Detection and Ranging*) sensors meet these specifications as they obtain altimetric data with great precision for large areas of study through the combined use of topographic and bathymetric LiDAR (Sánchez-Carnero et al., 2014). Being an airborne device, it also offers the possibility of covering large areas of land in each flight, having been used for many short-term erosion studies (only for the emerged part of the beach) and for very disparate coastal environments (Obu et al., 2017; Pye & Blott, 2016; Terefenko et al., 2019). However, its high price and, particularly, its temporal limitation (generally not available for historical data) prevent its use in many medium and long-term coastal erosion studies such as this case (the LiDAR flights –only altimetric data for the emerged part of the beach– available for the area of study refer to two flight coverages in the periods 2014-2015 y 2020-2021 –PNOA Plan–). Currently, the incorporation of altimetric or photogrammetric sensors in drones, together with the use of oblique photogrammetry, have been included as new sources of information for detailed scales that also allow the volumetric measurement of the coastal erosion phenomenon (Casella et al, 2020; Guisado-Pintado & Jackson, 2020). However, obviously, they are not available retrospectively for medium and long-term studies. In the light of this problem, the ideal data sources, which enable their retrospective use in the medium to long-term, are photogrammetry flights, particularly the use of the orthophotos derived from them, given the geometric reliability of the final product and its availability from the second half of the twentieth century to the present day, although we lose the altimetry component. In this case, their nature only allows the data of changes of the shoreline to be obtained, enabling the calculation of unidimensional changes (distances in metres) and bidimensional changes (areas in m²). In any event, these data do not directly quantify the erosion (volume eroded) but constitute a proxy (retreats and advances of the shoreline) that is closely related to it. Many types of these shoreline proxies have been used (Boak & Turner, 2005; Paris et al., 2013) and can be divided into two groups: the first, called “*feature-related proxies*”, as their name indicates, are based on recognisable elements in the orthophotos (water, vegetation, etc.) or on field work to delimit the shoreline; the second type, called “*datum-related proxies*”, are based on shorelines defined by altimetric thresholds (hydrographic datum, tidal levels, etc.) and are usually used when these high-precision altimetric data are available, normally drawn from LiDAR data (Aguilar et al., 2010). Therefore, the most used proxies to conduct these types of medium and long-term studies are *feature-related proxies* (Figure 1). These types of proxies are also those recently used in many global studies that use satellite images as an information source (Almonacid-Caballer et al., 2016; Espinosa-Montero & Rodríguez-Santalla, 2009; Luijendijk et al., 2018). The choice of the most suitable proxy of the many used of this type will depend, therefore, not only on the time frame of the study, but also on the characteristics of the shoreline where the beach is located (particularly in the case of micro or meso-tidal coasts) and on the elements that intervene in the coastal dynamics of the area of study (Paris et al., 2013).

In this sense, the afore-mentioned proxies are concentrated in the visible area of the information source, that is, the areas of the beach that are highest and emerged most of the time (depending on the tidal state at the time when the photo or satellite image is captured). These areas correspond, first, to the *backshore*, defined as the higher part of the beach exposed to the waves and unaffected by the normal wave run-up except during extreme weather events (Bird, 2011). In this part of the beach, the proxy that uses the “internal limit of the backshore” is used, principally marked by a change in the granulometry of the sediment and the possible presence of vegetation or other formations and morphologies (dunes or cliffs) or anthropic elements, with the

wind processes in the area being more active than on the rest of the beach. The proxies associated with this internal limit are more isolated from the frequent wave and tide variations as they are located in the upper limit of the transversal beach profile, if the photos are taken on dates when calm profiles are predominant, and are less vulnerable to seasonal changes. Therefore they are ideal for medium and long-term studies.

Figure 1. Principal feature-related proxies used



Source: Boak & Turner, 2005. Own elaboration

The second area of the beach where proxies can be located is the *foreshore*, which is defined as the intertidal zone of the profile. This area is dominated by hydrodynamic processes (Komar & Holman, 1986), principally the wave conditions, whether seasonal or occasional under the effects of an extreme weather event. In this case, the proxies taken in this coastal strip usually correspond to the different “wave run-up marks on the foreshore”, being highly prone to frequent daily changes in the waves and the tide as it is clearly located in the active beach profile. Therefore, they are problematic on meso or macro-tidal coasts due to the major impact of the tidal variation on them (Anfuso et al., 2007; Del Río et al., 2013; Díaz-Cuevas, 2020). However, it is the proxy most used for micro-tidal coasts (Guisado-Pintado & Malvárez, 2015; Rodríguez-Santalla et al., 2021) and/or when satellite images are used, given the current facilities for the almost automatic photointerpretation or the classification of the water line on the exposed beach (Alicandro et al., 2019; Pardo-Pascual et al., 2018; Viaña-Borja & Ortega-Sánchez, 2019).

Therefore, due to its greater suitability for the medium-term analyses of this study, which includes a mesotidal Atlantic façade and a microtidal Mediterranean façade, it has been considered that the most appropriate proxy to use is the one corresponding to the internal limit of the *backshore*, adapting to the possible elements that come into contact with it. In this way, in coastal sections where the beach connects with sandy formations, the limit will be marked by the foot of the dune (whether stable with vegetation or embryonic); in coastal cliffs with exposed beaches associated, the limit is marked by the contact between the base of the cliff and the interior limit of the transversal beach profile; and in areas altered by anthropic activity the limit is marked with the longitudinal infrastructures or other types of constructions located on the beach.

2. Methodology

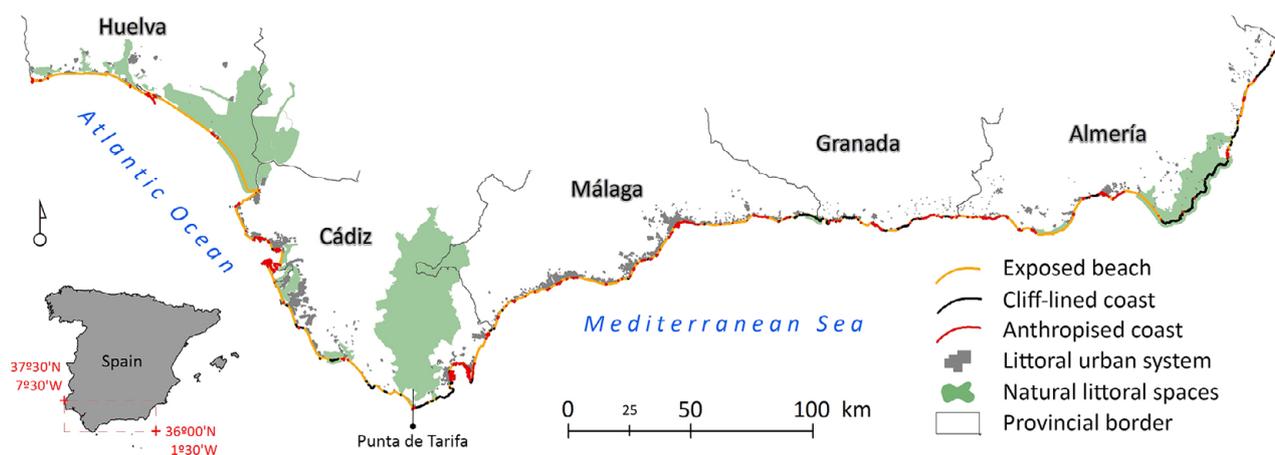
2.1. Area of study

The study exclusively focuses on all of the beaches on the Andalusian coast, composed of more than 900 km of shoreline exposed to waves (hereafter, ES), of which, almost 70% (630 km) correspond to exposed beaches. Given its location in the extreme south of the Iberian Peninsula, the Andalusian shoreline is divided into two clearly differentiated façades, bathed by two seas with different characteristics, which, together with the geomorphological characteristics of each of them, should be taken into account independently in the analysis of the results (Figure 2). This extensive area of study is, undoubtedly, one of the unique elements of this article, as it includes all of the exposed beaches in Andalusia, both on the Atlantic and Mediterranean coasts.

The Atlantic façade (317 km) runs from the border with Portugal and the mouth of the River Guadiana (Ayamonte, Huelva) to the Punta de Tarifa (Cádiz). It is a low coast, mostly sedimentary, where the beaches are long and wide with golden and fine sand. They represent 80% (250 km) of the shoreline of this façade.

The intense quaternary and historical sedimentary deposits of the large rivers of this coast (Guadiana, Guadalquivir, Guadalete, etc.) are currently limited to mainly the contributions of the Guadiana. However, the high availability of sandy sediments, together with the direction of the dominant waves and the orientation of the coast generates a dominant longshore drift from east to west throughout the whole sector, whose average fluctuates between 45,000 and 60,000 m³/year, with zonal peaks of up to 100,000 m³/year (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente [MAGRAMA], 2013). This has led to the development of many barrier islands and littoral sandy spits, which have isolated large sectors of former estuaries and bays from the waves, generating very large interior tidal marshes (including the vast Guadalquivir marshes that have mostly evolved into fluvial-pluvial marshes). The waves that affect the beaches on this coast have a moderate energy, with a significant average wave height (hereafter, Hs) that fluctuates between 1 and 1.5 m (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible [MTMS], 2023), but with a large fetch and a tide range typical of a mesotidal coast (around 3-2 m on average), decreasing from west to east as it nears the Strait of Gibraltar where it is around 1 m. The greater presence of the Baetic foothills close to the Strait is evident in the geomorphology, where the low reliefs progressively give way to the occasional presence of cliff sectors and pocket beaches associated with flysch outcrops. The human presence on the Atlantic coast, despite being concentrated around the large coastal historical urban centres (Huelva or Cádiz), has grown exponentially throughout the twentieth and twenty-first century. Together with the expansion of the urban centres and peripheries, another part of urban growth corresponds to newly built residential areas, either as an extension of pre-existing urban centres or as isolated urban developments. The presence of many protected natural spaces in the area (around 30% of the Atlantic Andalusian beaches), of different types (National Parks, Natural Parks, etc.), has played a fundamental role in the natural preservation of the shoreline.

Figure 2. Area of study



Own elaboration

The Mediterranean coastline, runs from the Punta de Tarifa (Cádiz) to the Playa de los Cocedores (Pulpí, Almería), marking the border with the neighbouring region of Murcia. The presence of large mountainous relief (Baetic System) a few kilometres from the coast has generated a more diverse shoreline, broken by capes and the development of coastal plains at the bottom of the mountainous foothills with which the different coastal features are associated. On this coast, the hydrographic network has a considerable average slope, which, together with the torrential nature of its flows, gives the rivers a large sediment input capacity in its final section, historically generating the formation of deltas at its mouth, which are distributed along the coastline. The beaches in this case are shorter and narrower and are composed of sediments of a large granular size than the Atlantic beaches, representing 63% (370 km) of the ES of the coastline (590 km). There is a greater presence of cliff sections (almost 25% of the total façade), which has generated the presence of small bays and pocket beaches. The waves affecting the Andalusian Mediterranean coast have a lower average energy, with an average Hs of 0.5 m (MTMS, 2023). There is also a lower fetch and the tidal range corresponding to a microtidal coast (less than 1 m) along the whole of its length. The directions of the dominant waves and the orientation of the coast generate less intense coastal longshore drifts than on the Atlantic coast. In general, from Estepona to Gibraltar the direction of the dominant longshore drift is east to west, from Estepona to Cabo de Gata west to east and north to south in the eastern sector of Almería. Together with the

current lower availability of sediments, the average intensity fluctuates between 35,000 and 40,000 m³/year, with zonal peaks of up to 75,000 m³/year (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino [MARM], 2009). The urban growth on the Mediterranean shoreline has been much greater than that on the Atlantic coast, particularly from the 1960s. The early development of the tourism activity, in many cases before the enactment and existence of laws to protect natural areas, has generated an urban continuum in large areas of many sections, clearly visible in the sector of the Costa del Sol in Málaga.

2.2. Data sources

The data selected for the study are made up of the orthophotos generated from the photogrammetric flights of 2001-2003 (panchromatic), 2010-2011 (colour) and 2019 (colour) corresponding to the PNOA Plan. Those that are downloadable in digital files have been used, as those accessed as an interoperable WMS (*Web Map Service*) from the Spatial Data Infrastructure of Andalusia website (IDEAndalucía) can lose visual quality when sent to the web client in formats with destructive compression (.jpg) and their use can be problematic from a geometric perspective if the web client that uses the WMS service transforms the coordinate reference system prior to their application in the visualisation and digitalisation processes (Figure 3).

Figure 3. Orthophotos used for the photointerpretation process

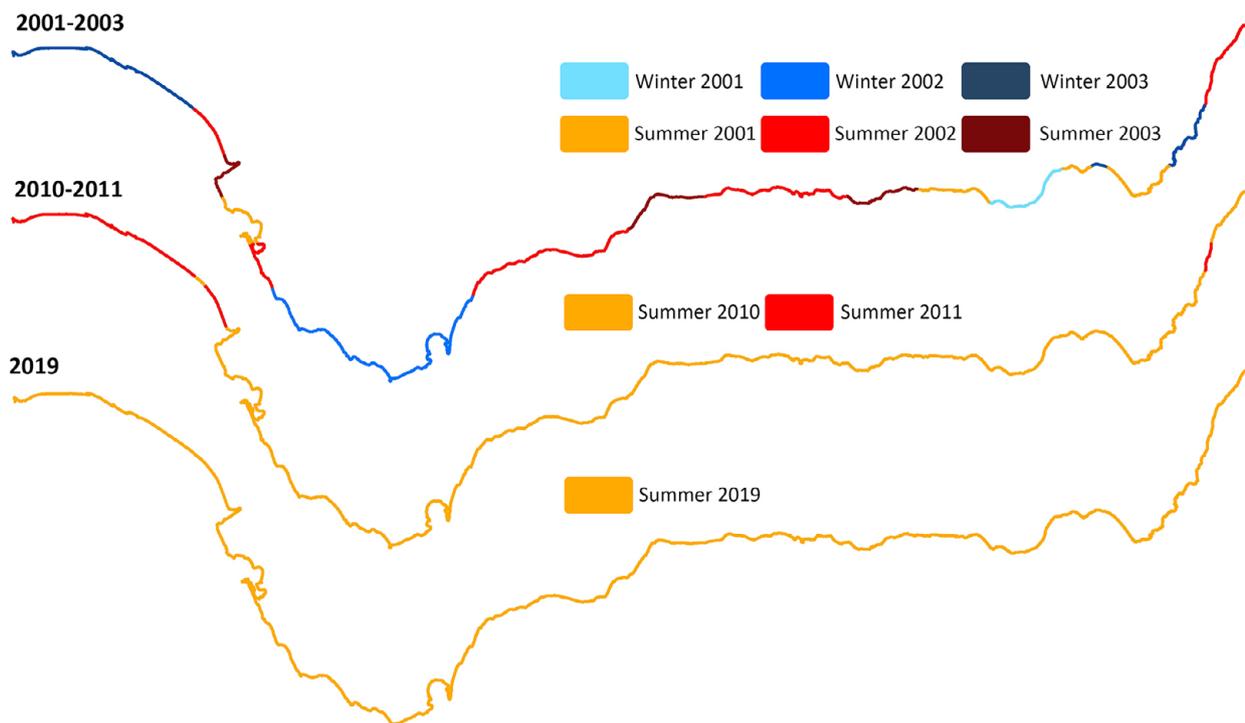


Source: the Spatial Data Infrastructure of Andalusia (www.ideandalucia.es)

For the cliff areas, the Ortoimagen Quickbird-Ikonos of 2005 was used (provided by the Cartographic and Statistical Institute of Andalusia –IECA–), with a spatial resolution of 0.7 m. The height of the spatial platform from which the image was taken eliminates possible errors in the photointerpretation caused by the apparent displacement of objects with a certain height, such as cliffs. However, given its very occasional use for higher cliffs, it has not been taken into account when calculating digitalisation errors and does not participate in the calculations of the retreating or advancing rates of the shoreline.

As previously mentioned, the date when the orthophotos were taken is vitally important for choosing the proxy to use and for the subsequent interpretation of the rates. In order to obtain it, a review of the dates when the photographs were taken has been made, using the information of the centroids of the photos of the photogrammetric flights (available as metadata in the IECA). In this way, the date of each photo was obtained and was subsequently integrated into the orthophotos used as a source of information. As a result, it may be observed that, while the flights of 2010-2011 and 2019 corresponded to dates generally associated with a calm or summer period, those of 2001-2003 was made up of different flights at very different times of year, with sectors of the provinces of Huelva, Cádiz and Almería covered in the winter, so care should be taken when considering the calculations in which the shorelines of this date are included (Figure 4).

Figure 4. Dates of data sources



Source: Prieto-Campos (2017). Own elaboration

2.3. Data model

A peculiar feature of this study is the fact that each digitalised shoreline is incorporated into a spatial database (PostgreSQL/PostGis) which is associated with both the geometry and a data model composed of thematic alphanumeric information. It provides full descriptive information about each digitalised section of coastline from a physiographic point of view (hierarchical coastal type, presence and characteristics of infrastructures, cliffs, dunes, beaches, type of substrate and accommodation space—Prieto-Campos et al., 2019—), toponymic information (toponymic sub-model) and the key aspects of the digitalisation, which are interesting for the subsequent calculation of the retreat/advance rates (criterion and digitalisation errors, presence of coastal infrastructures, proximity to urban land, etc.).

Subsequently, a new set of tables was added to this data model with the calculations of the rates, through the spatial intersection of the shoreline with the transects that contain all the information about their calculation for the different periods. This data model has been presented in different articles (Fernandez-Nunez et al., 2015; Prieto-Campos et al., 2018a) and national and international congresses (Prieto-Campos et al., 2018b). In this article, the incorporation into the transects of the types of longitudinal coastal infrastructures and the built areas on the shoreline in a detailed working scale, has been essential for interpreting and classifying the results.

2.4. Data gathering and collection

The photointerpretation and digitalisation process of the shoreline with the chosen proxy have been conducted on a 1:2,500 scale for the whole area of study using the proprietary software ArcGis 10. The coordinate reference system used in the whole process, in accordance with the current legislation (RD 1071/2007), is the *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89), using the UTM projection zone 30, coinciding with that of the original orthophotos used.

As already mentioned in the section on the theoretical framework the proxy chosen, corresponding to the internal limit of the *backshore*, marks the contact between the beach and the first dune ridge, either stable (with vegetation) or embryonic. In the case where there are cliffs with associated beaches, the contact between the beach and the base of the cliffs is taken into account. For the cases in which the limit coincides with a coastal

anthropic infrastructure (breakwater, maritime promenade, buildings, etc.), its contact with the transversal beach profile is used (see section 3.1).

Another unique aspect of the process of shoreline digitalisation is that, although the large scale enables a detailed and in-depth digitalisation to be made, given the medium-term nature of the study, a detailed and more smoothed digitalisation of the shoreline has been performed of certain sections, mainly those with small but abrupt interruptions of the shoreline (for vehicle access, small river mouths, etc.) that alter the continuity of the shoreline (Figure 5). This strategy is more suitable for the nature of the erosive processes, which in the medium to long-term, tend to generate a homogeneous retreat of the shoreline. On the other hand, it is very useful for calculating (to eliminate *outliers*) *setback retreat* (Goble & MacKay, 2013; Ramsay et al., 2012) in future scenarios, for which there are tools in the software (ArcGis 10) used in this study, in this case, the *Digital Shoreline Analysis System* –hereafter, DSAS– (Himmelstoss et al., 2021).

2.5. Error assessment

Digitalisation errors are inherent in the data collection process and should be taken into account when exploiting and interpreting the results. The errors made directly affect the reliability of the results obtained and depend both on the characteristics of the data sources used (von Meyer et al., 1999) and the physical and morphodynamic characteristics of the coast in relation with the chosen proxy and, finally, on the digitalisation process of the operator. This aspect is extensively debated in the international scientific literature (Apostolopoulos & Nikolakopoulos, 2020; Genz et al., 2007; Moore, 2000) and different estimations has been proposed in the literature published on certain sectors of the area of study (Aguilar et al., 2018; Del Río & Gracia, 2013, Molina et al., 2019). However, in these latter cases, they have been used in studies mostly using different “water mark” proxies both on the Mediterranean coast due to its microtidal nature (Viciano, 2001) and on the Atlantic mesotidal coast for which its application is more problematic. In the cases that refer more to the use of photogrammetric flights, the errors associated with the source used are incorporated (scanning error, co-registration errors of the different photos/images, orthorectification and pixel size errors), together with errors related to the morphodynamic characteristics of the coastal section (wave run-up, tidal range, transverse profile slope, etc.), essential when the water marks proxies are used and, finally, those related to the digitalisation process caused by the human error of the operator (precision of the operator in accordance with the scale of the study and the photo interpretation of the criterion used –shoreline proxy–).

In the case of this study, three types of errors have been taken into account. The first is related to the source of information. As the orthophotos were taken within the national plan (PNOA) and due to the recent and mostly digital nature of the flights (twenty-first century), the error associated with scanning and co-registration between dates has been ruled out, as using the same support points for the triangulation and orthorectification, the quality of the adjustment is excellent (see Figures 2 and 5). Furthermore, the calculations of the rates will be carried out with relative values (distance between the lines of the proxy on different dates), not with absolute positional error. Given the data sources used, the error related to the pixel size (spatial resolution) is included in this group, which fluctuates between 0.25 for the most recent date (2019) and 0.5 m for the other two dates.

The other two types are related to the precision of the operator in the digitalisation process. One of them refers to the precision of the operator in relation to the scale of the digitalisation (Vila & Varga, 2008), in this case 1:2500. In order to obtain a quantifiable error of this kind, a recognisable point element on the same orthophoto has been digitalised by a single photo interpreter ten times and on the same sized screen, obtaining an average distance between them of 1.5 m. The third error used is related to the precision of the photo interpreter in the digitalisation of the criterion (shoreline proxy) used. To do this, three pilot zones were chosen in the area of study, one for each coastal type with which the proxy is associated (dunes, cliffs with associated beaches and beaches in contact with infrastructures or anthropogenic elements) and the lines of contact of the upper limit of the transversal beach profile for each type were digitalised ten times by the same photo interpreter and the different tests were quantified. In this way, an average error of 1.25 m was obtained throughout the lines digitalised. Finally, the errors related to the physical and morphodynamic characteristics of the coastal section were ruled out by the type of proxy chosen because, as this proxy is located in the internal limit of the backshore, it is on the upper limit of the transversal beach profile and, therefore, would not be affected by the changes in waves or tide in the cases where the date of the orthophoto is in the summer (calm profile). This occurs in all of the cases in this study except for certain sections of shoreline in 2001 (see section 2.2), the results for which should be taken with more caution.

The calculated error, therefore, is the root of the quadratic sum of the previously described errors (*Root Mean Square*, hereafter, RMS). This error expresses the average value of the distance between the estimated location of an object and the real location (Morton et al., 2004), determined by the following formula:

$$RMS = \sqrt{Error_{resolution}^2 + Error_{scale}^2 + Error_{criterion}^2}$$

The result, expressed in metres, shows the total mean square (Table 1).

Table 1. RMS through data sources

Orthophotography	Resolution error (m)	Scale error (m)	Criterion error (m)	RMS (m)
2001-2003	0.5	1.5	1.25	2
2010-2011	0.5	1.5	1.25	2
2019	0.25	1.5	1.25	1.9

Own elaboration

However, the RMS has also been calculated for each period of study, expressed in m/year.

$$RMS_{period} = \frac{\sqrt{RMS_{date 1}^2 + RMS_{date 2}^2}}{Time}$$

In this way, they can be applied to the rates as they are expressed in the same unit. The RMS by period is shown in Table 2.

Table 2. RMS by period

Period	Time per period (years)	RMS by period (m)	RMS by period (m/years)
2001-2019	18	2.7	0.2
2001-2011	8.58	2.8	0.3
2011-2019	8.5	2.7	0.3

Own elaboration

2.6. Calculation of erosion rates

After digitalising the shorelines, the erosion rates of the beaches were calculated, both for the entire period and for the two subperiods using the previously mentioned DSAS tool. This tool has been extensively used in many studies on coastal morphological evolution for both coastal areas protected from the waves (Bera & Maiti, 2019; Tinh & Hens, 2017) and exposed areas (Fernandez-Nunez et al., 2015; Prieto-Campos et al., 2018a; Kabuth et al., 2014; Quang et al., 2021).

The rates have been calculated using a baseline, parallel to the shoreline, along which 50 m equidistant transects have been generated that perpendicularly cut the shoreline of the proxy (Figure 5). A total of 15069 transects have been generated, of which almost 80% (11835 transects) correspond to exposed beaches, amounting to a total of 250 km of beaches on the Atlantic coast and 370 km on the Mediterranean coast.

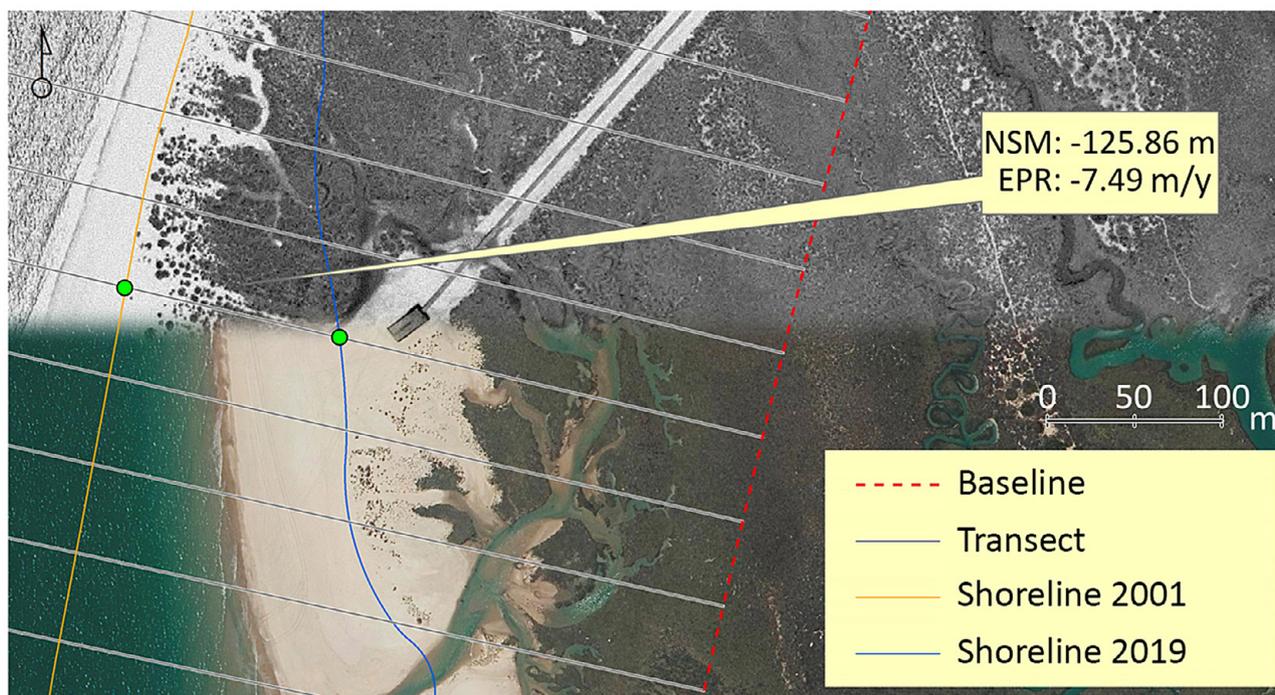
The periods contemplated for calculating the erosion rates correspond to the overall period (2001-2019) and have been complemented with the rates calculated for two subperiods (2001-2011 and 2011-2019), to capture changes in trend of the different coastal sectors throughout the entire period of the study.

Of the wide range of statistics resulting from the process of calculating the rates using the afore-mentioned tools, and due to the number of orthophotos used, only two statistics have been used: the *Net Shoreline Movement* (hereafter, NSM) expressed in metres, which shows the net distance between the oldest and newest shoreline; and the *End Point Rate* (hereafter, EPR) or annual rate of change, expressed in m/year, which is the result of dividing the distance calculated in the NSM between the time elapsing between the two data sources (Figure 5).

The results obtained from the former (EPR) are those mainly used in this study. To do this, those sectors with an uncertainty range equal to or lower than the highest value estimated by the RMS of the periods previously

calculated, have been considered as “stable”. To do this, the threshold of ± 0.3 m/year has been established. In this way, the sectors where there is a predominance of negative (retreat) and positive (advance) rates are more solidly identified on a regional level.

Figure 5. Calculation of erosion rates through transects



Own elaboration

3. Results

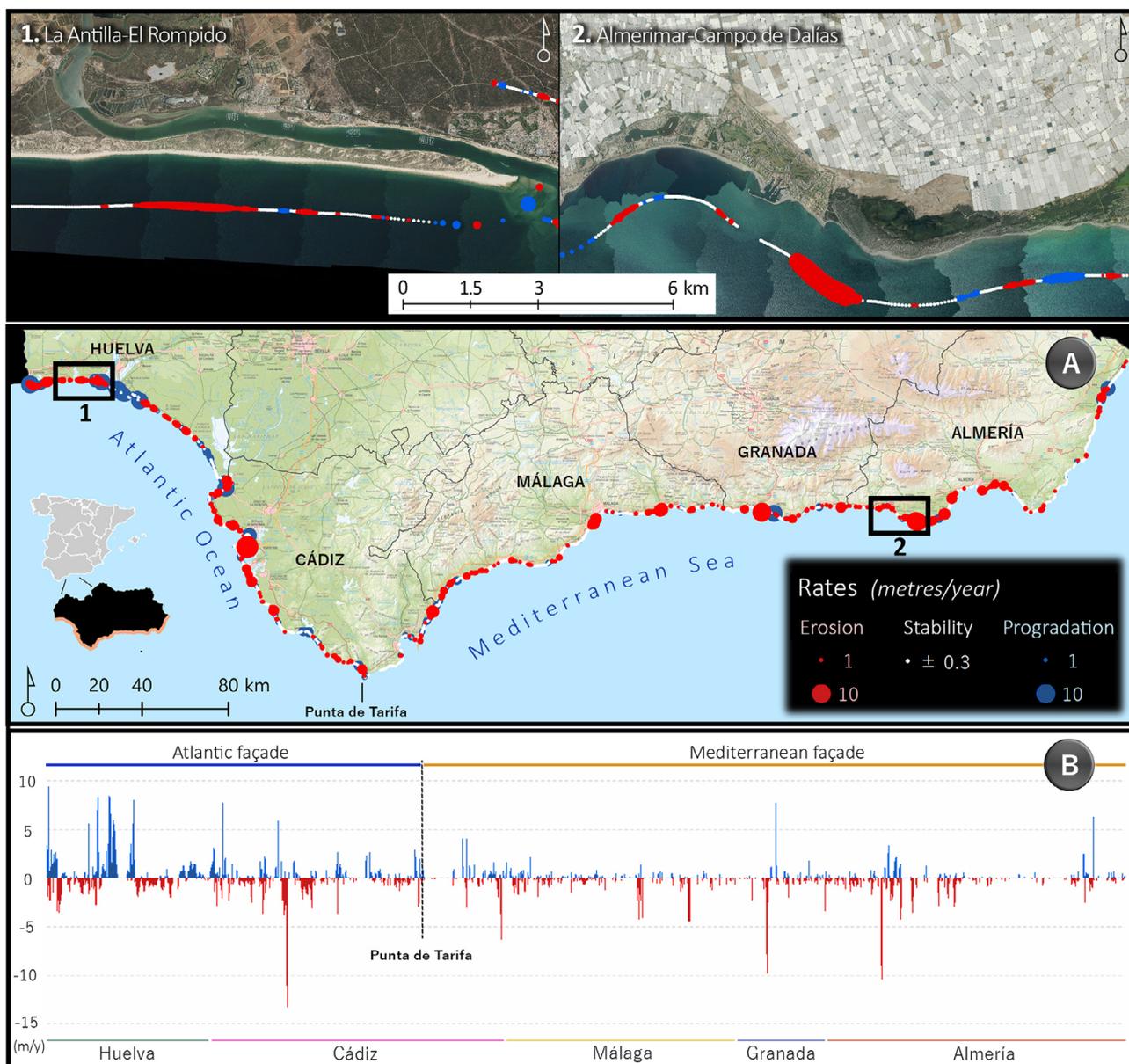
First, and as explained in the methodology, the results of this study are embodied in the creation of a spatial database (PostgreSQL/PostGis) for all of the exposed beaches, where for each transect all the statistics are calculated for the rates (NSM and EPR), together with all of the information generated in the shoreline photo interpretation and digitalisation process (geomorphological types, dates of the centroids of the orthophotos, toponymy, the presence and type of anthropic infrastructures, the proximity to the built-up space, etc.), which is highly interesting for future studies and facilitates a detailed interpretation. From this, the calculations of the rates have been extracted (EPR and NMS), together with the thematic information on longitudinal coastal infrastructures or other types of anthropic construction for their classification and interpretation, the results of which on an overall time scale, by period and by façade are presented on a regional scale. As a transversal and complementary result to those offered in this article, a free access web client has been elaborated (geoviewer and widgets) for geovisualization, consulting and filtering (by façade, province, type of behaviour and trends, etc.) all of the data obtained at a maximum level of detail. To do this, the *Builder* tool of the *cloud* platform of the company CARTO¹ has been used, which connects to the data stored in the spatial database (PostgreSQL/PostGis) generated for this article. The link to access the web client is <https://universidad-sevilla.carto.com/u/univ-sevilla-admin/builder/8f7ec7b6-70df-4378-8eec-ce9f561f6672/embed>

3.1. For all the beaches of Andalusia

The overall results are shown in detail in the afore-mentioned web client link and summarised in Figure 6. Given the semiological problems that are derived from the scale of the figure, two sectors at a detailed level (1 and 2) have been incorporated in the figure to assess its original spatial expression. Both the map and the graph of the Figure 6 reveal the predominance of sectors with a negative evolution in the rates (retreats) in relation to those that show a positive evolution (advances) and the much more dynamic behaviour on the Atlantic coast than the Mediterranean coast (variability of the intensity of the values of the rates).

¹ To optimise its use and possibilities, consult the following link: <https://carto.com/help/tutorials/using-builder/#widgets>

Figure 6. Map (A) and graph (B) showing the spatial distribution of the erosion rates (EPR) for the global period 2001-2019



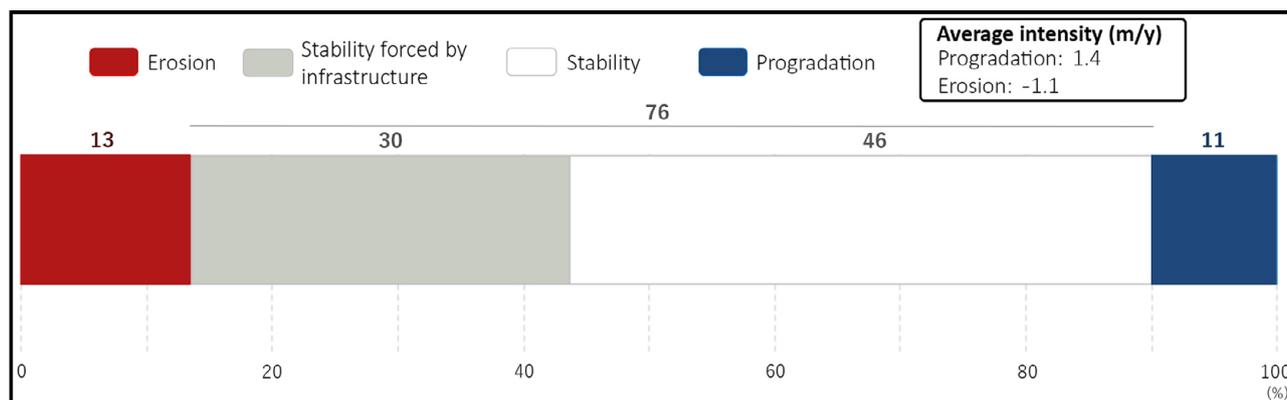
Own elaboration

Figure 7 has also been elaborated for the overall period, summarising the percentages of each of the sectors with a different behaviour or trend on a regional scale (with the use of the chosen proxy). Particularly noteworthy is the spatial predominance (number of transects) of the stable sectors (understood as those that have rates contemplated within the square mean error adopted as a level of uncertainty $\pm 0,3$ m/year), which are associated with 76% of the beaches, although this behaviour usually responds, in almost half of the cases (30%) to anthropic causes (stability forced by infrastructure) related to the “rigidisation” of the shoreline through longitudinal infrastructures (retaining walls, maritime promenades, etc.) or other anthropic elements. As these longitudinal infrastructures prevent the free fluctuation of the shoreline, the sectors with a presence of these infrastructures appear to be stable when applying the internal limit of the backshore as proxy and the level of uncertainty adopted. However, the presence of these defence structures would, on the whole, indicate a regressive behaviour that justifies the protection measures.

On the other hand, it may be observed that the sectors with negative rates (retreat) and positive rates (advance) represent 13% and 11% of the total of the beaches analysed, respectively. The erosive sectors (retreat) are predominant along the length (number of transects) but the values of the rates within them have a lower average intensity (-1.1 m/year) than the prograding sectors (1.4 m/year). This paradox (spatial

extension/intensity) resides, on the one hand, in the nature of the coastal features of which both sectors are composed and, on the other hand, in the techniques that measure the retreat/advance with the shoreline proxy used. Being a unidimensional measurement technique (distance of fluctuation between shorelines), the height of the sectors involved is not taken into account, which is a critical factor for the correct volumetric interpretation of the erosive processes. In this way, the rates of the regressive sectors mostly affect beaches associated with different sized cliffs or micro cliffs associated with dunes, the height of which generates a deceleration of the shoreline retreat, although they mobilize and contribute a larger volume of sediments to the coastal system that the sectors with the same rate but a lower height in coastal features. The rates of the prograding sectors, on the other hand, have higher shoreline advance values, as they are usually associated with low height sedimentary features (whose advance needs to move a lower volume of sediments), such as the prograding sectors of the deltas or prograding beaches with incipient dunes.

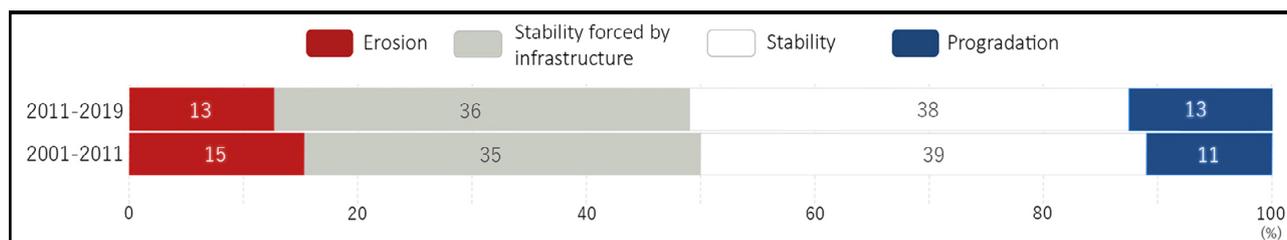
Figure 7. Percentage of trends for the overall period



Own elaboration

Figure 8 shows the overall behaviour by subperiod, reflecting a slight increase in the percentage of the sectors with prograding rates in the final period increasing from 11% to 13%. Another phenomenon observed is the slight reduction in the clearly regressive sectors, which have decreased by 2% with respect to the previous period (from 15% to 13%). However, half of this reduction (1%), rather than a change in trend, corresponds to sections that shift to a stability forced by the presence of infrastructures designed to combat the retreat of the shoreline during the preceding subperiod. The percentage of these sections has risen from 35% to 36%.

Figure 8. Overall trends by subperiod of the study



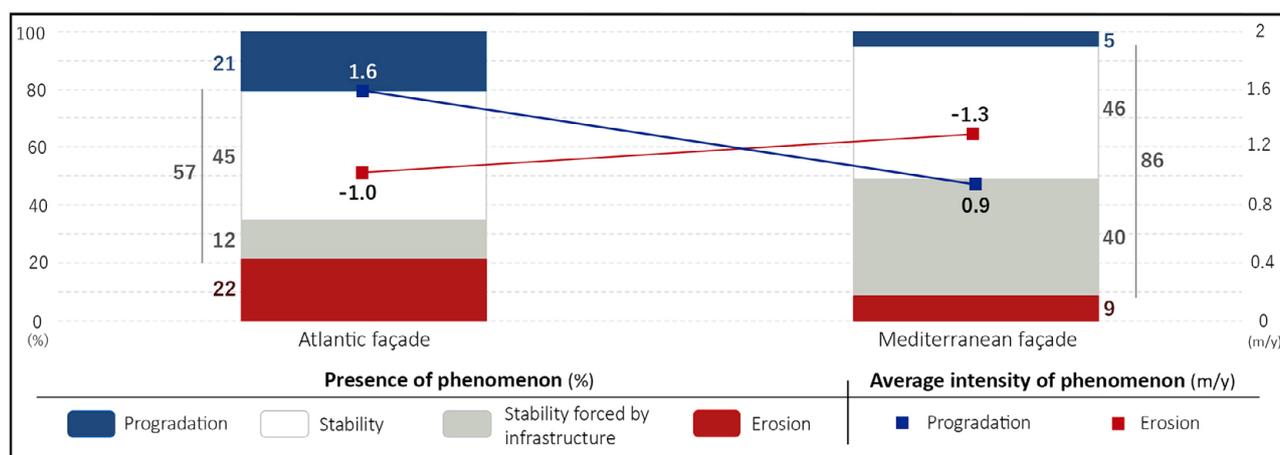
Own elaboration

3.2. By façade (Atlantic and Mediterranean)

The analysis by façade (Atlantic and Mediterranean) for the overall period shows substantial differences (Figure 9).

A clear predominance of the stable sectors (86%) can be observed on the Mediterranean façade, of which 40% correspond to sectors of stability forced by the presence of large anthropised sectors (mainly the Costa del Sol). The Atlantic façade, on the other hand, exhibits a reduction of these sectors, representing 57%, of which only 12% correspond to forced stability sectors. This fact indicates, most of all, the greater anthropic pressure on the Mediterranean coast, whose growing urbanisation has taken up a large part of the shoreline with large built-up spaces that are in direct contact with the transversal beach profile and, in other parts, have required the construction of longitudinal coastal infrastructures for their defence (walls, breakwaters, maritime promenades, etc.).

Figure 9. Percentage and intensity of the rates for the period 2001-2019 according to the coast



Own elaboration

Meanwhile, there are more regressive sectors on both façades than prograding sectors, representing 22% on the Atlantic façade and 9% on the Mediterranean one. However, the intensity of the regressive sectors is lower than that of the prograding sectors on the Atlantic coast (-1 m/year as opposed to -1.3 m/year), corroborating the previously described paradox due to the presence of cliffs on soft rocks and microcliffs on dunes, whose height slows down the retreat. On the Mediterranean façade, this phenomenon changes completely. Here, the retreat rates (erosion) are higher in intensity (-1.3 m/year) to the prograding rates (0.9 m/year). On the Andalusian Atlantic coast, the regressive sections are, mostly, related to the effects of the sedimentary deficit caused by the presence of large coastal infrastructures, in this case transversal (dikes, breakwaters, ports, etc.), which intersect the longshore drift, which is very strong on the Huelva coast, generating a sedimentary deficit in the adjacent sections. Therefore, the effects of the dikes and jetties constructed for the channelling of the Guadiana may be observed in certain sectors of the beaches of Isla Canela (with regressive rates that are sometimes over -4 m/year). Similarly, the effect of the dikes and jetties of the Ría Carreras (Isla Cristina) are also clearly manifested in the adjacent beaches of Redondela, Islantilla and La Antilla, beyond the shadow effect cast by the infrastructures. On the other hand, the enormous Tinto-Odiel dike generates erosive effects towards the east on all of the beaches connected to the impressive Asperillo cliff. In Cádiz, the effect of the channelling of the Guadalete is manifested at the distal end of the beaches associated with the barrier islands of Los Toruños (Playa de Valdelagrana) and, occasionally, the effects of the dikes of the river Barbate and its port are manifested to a lesser extent (less coastal drift) on the beaches located south of them. On the Mediterranean coast, the most significant regressive sectors are related to the erosion of the deltas of the rivers that drain onto this coast, the majority with a sedimentary deficit due to the regulation of the basins. The most evident cases are those associated with the rivers Guadiaro, Guadalfeo, Guadalhorce, Vélez or Andarax. They are also connected to the effects of coastal transversal infrastructures. An extreme case is that of the Almerimar Port with rates of up to -10 m/year. Finally, the high dynamism of the exposed shoreline of Campo de Dalías also has regressive sections, but in this case with a greater temporary mobility due to the natural dynamics of this sector.

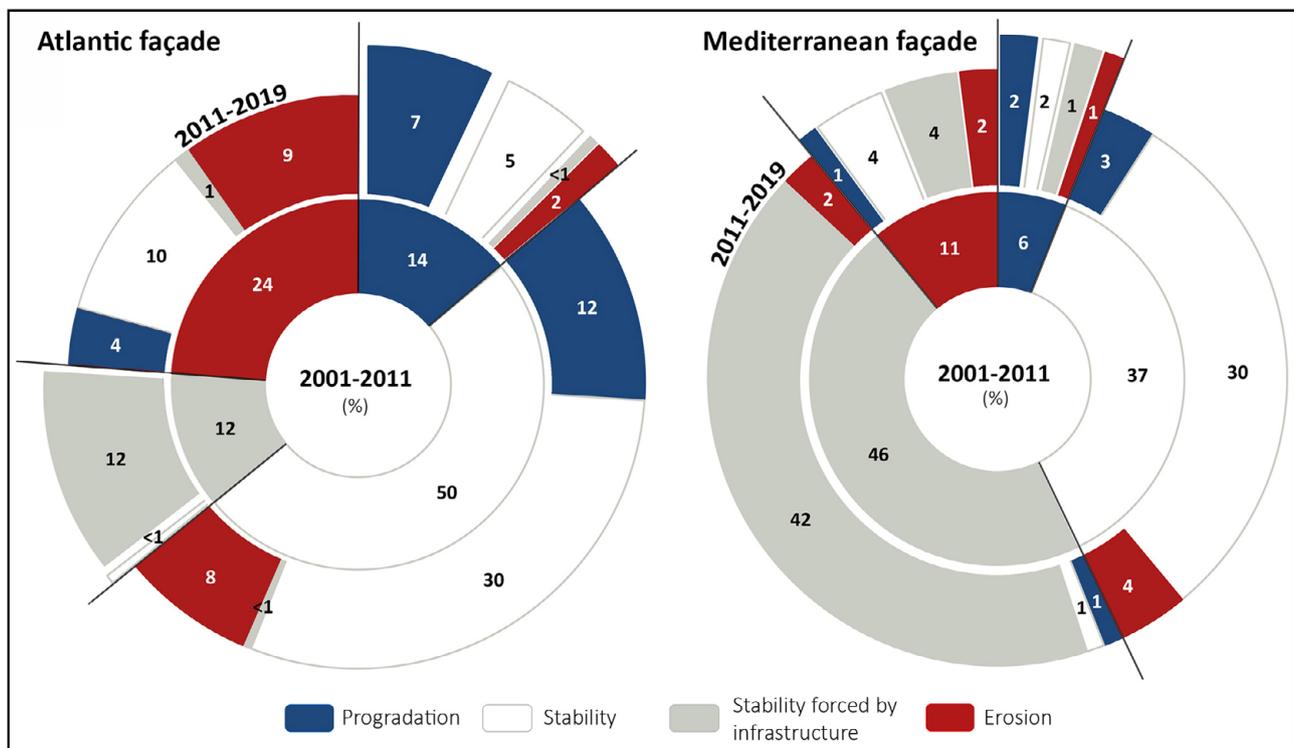
In the case of the prograding sectors (accumulation), the changes of the shoreline of the chosen proxy also enables sectors with an undeniably positive balance to be identified (advances). On the Huelva coast they are logically located in the prograding sections associated with the barrier effect exercised by the aforementioned large transversal infrastructures to the longitudinal sedimentary drift and the resulting sediment retention. Prograding sectors may be observed in occasional sections of the beaches of Isla Canela or Isla Cristina, derived from the combined barrier effect of the Guadiana and Carreras dikes or, on the Punta Umbría beach, due to the effect of the breakwater channelling the outflow of the Tinto-Odiel estuary at the far end of the beach. Special cases, unrelated to the barrier effect of the infrastructures include the case of the distal end of the littoral spit of El Romido where sediments continue to be deposited originating from the regressive sections of the beaches to the west or the advances of the shoreline on the littoral spit of Punta del Malandar, which receives all the sediments eroded from the El Asperillo cliff. This is added to the effect of the orientation of the beaches of this littoral spit with respect to the dominant wave which, as it turns south, reduces the coastal longshore drift processes significantly. The prograding sectors identified on the beaches of Cadiz are also clear but more intermittent. This is due to the barrier effect of the port breakwaters such as

the one in Chipiona or in the Hierbabuena beach due to the retention of sediments by the Barbate port. On the Mediterranean coast, the prograding sectors are also associated with the barrier effect to the longitudinal sedimentary transit of the dikes in ports such as Sotogrande and Cabo Pino and the western sector of La Azucena beach (Motril port) with retreats of -4 m/year or the Puerto del Rey (Vera) with -2.2 m/year. The rest of the prograding beaches are scarce on the Mediterranean coast due to the chronic sedimentary deficit arising from the reduction in fluvial inputs as a result of the regulation of the drainage basins and/or the anthropisation of the coast. Only in the case of the beaches of the exposed shoreline of Campo de Dalías can we find prograding sectors that are unrelated to the barrier effect of the many transversal infrastructures located on the Mediterranean façade due to their high level of dynamism.

3.3. Percentages and trend changes by subperiod and façade

Figure 10 shows the changes in trend generated in each coastal section characterised by a type of behaviour and trend (erosion, accumulation, stability forced by infrastructures and stable) in the initial period (2001-2011) and their evolution towards other types of trend in the final period (2011-2019), for each façade (Atlantic and Mediterranean)².

Figure 10. changes in trend by subperiod and coast



Own elaboration

Analysing the trends of the rates during the first subperiod (2001-2011), a clear majority of stabilised sectors can be observed (stable and forced stability) with a different spatial expression depending on the façade. On the Atlantic façade, 62% of the sectors display a stable behaviour, of which only 12% are due to sections with longitudinal infrastructures on the seafront. On the Mediterranean façade, the stable sections account for 83% of the total, and more than half of these (46%) correspond to sections with stability forced by infrastructure.

The trend exclusively of the stable sectors remained unchanged on the whole during the last subperiod (2011-2019), with slight differences depending on the façade. On the Atlantic façade, there is a predominance of sectors with changes towards a positive trend (12%, equivalent to 27 km of coastline), in the river mouths of the Atlantic coast, in areas affected by large transversal infrastructures (beaches of Isla Canela, Punta Umbría or

² To complement this figure (and for locating the place names included in the text) and as a way of exploring the results in more detail, the use of the web client developed is recommended. The rates calculated for each of the transects analysed may be accessed and the changes in trend from a particular trend type to any other possible trend in any of the period used may be explored and quantified.

Cañillos) and long beaches exposed to a significant coastal longshore drift (beaches of Castilla). The sections with changes towards a negative trend represent 8% (equivalent to 18 km), concentrated in the central sectors of the large littoral spits of this façade (Nueva Umbría or Camposoto beaches), in specific sections of the river mouths and in zones close to erosive sectors in the first subperiod (beaches of Mazagón or Punta Candor).

On the Mediterranean façade, on the other hand, there is a predominance of sectors with changes in trend towards erosion in the last subperiod (4%, equivalent to approximately 15 km), concentrated almost exclusively at the principal deltas (Guadalhorce and Andarax) and the Campo de Dalías, which has complex dynamics. The stable sectors that change to prograding trends account for just 3% (equivalent to 10 km) and are found intermittently along the whole of the coast in areas under the effects of the sedimentary retention caused by new transversal infrastructures (breakwaters), at some river mouths (Almanzora) and, again, on the exposed shoreline of the Campo de Dalías, where there is an alternation of progressive and regressive sectors.

The forced stable sections in the first subperiod with a change of trend in the second only occur on the Mediterranean coast, where 2% of sections with changes to retreat rates can be observed, which indicates the elimination of infrastructures in erosive areas and 1% of sections towards advance rates due to the emergence of dunes as a result of sedimentary accumulation in areas with longitudinal coastal infrastructures (Playa de Carchuna) or due to the extension of these infrastructures (Playa de la Butibamba).

In the first subperiod, a lower percentage of prograding sections than regressive sections can be observed on both façades, although there are also slight differences (see Figure 10). The Atlantic façade has a higher percentage of progressive sections (almost triple) than the Mediterranean coast. Half of these sections display the same trend throughout the second subperiod, located in historically accumulative sectors, such as the areas neighbouring the large river mouths (Guadiana and Guadalquivir), distal sections of the sandy littoral spits (El Rompido) and areas under the effects of the sedimentary retention of large transversal infrastructures such as dikes and ports (playas del Espigón and Hierbabuena beaches). A third of the accumulative sections (5%, equivalent to 12 km of beaches) shifted to a stable trend in the last subperiod, due to a reduction in the sedimentary input.

The Mediterranean coast also maintained its prograding trend in the majority of the accumulative sections in the first period, although with a lower percentage (less than one third). These sectors correspond to sedimentary retention areas due to large port infrastructures, such as the El Rinconcillo, Las Azucenas or Las Marinas beaches. There is a very similar percentage of sections with a change towards a stable trend, due to the construction of new longitudinal infrastructures on the seafront, such as the La Galera beach. Changes towards a regressive trend can be observed in specific sections of the shorelines of the deltas (Guadalhorce, Vélez, Andarax, Almanzora) and in areas of the exposed shoreline of Campo de Dalías, whose dynamics, as previously mentioned, are characterised by the alternation of accumulative and erosive sectors, although as a whole they do not account for more than 1% the Mediterranean coast (equivalent to 5 km).

Finally, the sections that were regressive during the first period also underwent changes in trend similar to their accumulative counterparts. On the Atlantic façade, 9% of the sections maintained their regressive trends (a total of almost 21 km of coastline), visible in specific sections of the Acantilado del Asperillo and sections of Punta Montijo, Punta Candor, Playa de Levante or Camposoto. Regressive sections may be observed with changes in trend towards stability in intermediate sectors of long beaches, due to a reduction in the inputs from the coastal longshore drift, as they are located close to erosive areas of the initial period and often adjacent to them.

On the Mediterranean coast, an overall change in trend may be observed in the regressive sections of the first period towards stabilisation (more than two thirds of the erosive sectors in the first period), half of them related to a stability forced by anthropic infrastructures. These sections correspond to urban expansions, such as the southern sectors of the San Andrés or Los Cerrillos beaches and the implementation of retention walls in clearly regressive areas (Playa de Torre del Mar).

4. Discussion

The volumetric nature of coastal erosion requires tridimensional information sources for its comprehensive quantification and the correct interpretation of the results. The lack of retrospective altimetric information sources for the whole period analysed, in this case, has led to the use of proxies based on shorelines (“*feature related proxies*”) that only allow the unidimensional (m/year) or bidimensional (m²/year) quantification of their fluctuations in order to assess the behaviour of the erosive processes during the overall period used (2001-

2019). To do this, recent photogrammetric flights have been used, from which orthophotos have been derived with a suitable spatial resolution (0.5 and 0.25 m) and high individual and comparative geometric fidelity as they are generated with shared support points for the orthorectification process for all of the flights within the PNOA Plan. This means that the uncertainty and error calculations related to the information source are simplified with respect to other previous studies, even in parts of the area of study (Molina et al., 2019), as certain components usually used in their calculation related to the source (scanning, co-registration, etc.) can be eliminated. On the other hand, the chosen proxy (internal limit of the backshore) is considered the most appropriate to use for the area of study for both mesotidal coasts (Atlantic façade) and microtidal coasts (Mediterranean façade). As it is located in the upper part of the transversal beach profile, this proxy combined with the flight dates (almost all associated with calm profiles –summer–) means that other components used to calculate the error when “water marks” proxies are used (always located within the active beach transverse profile) can also be eliminated (slope, characteristics related to the waves run-up, tidal range, etc.). However, two components related to the potential error in the digitalisation process made by the photo interpreter have been proposed, namely, the combination of the scale used (1:2500) and the size of the screen and the potential error in the digitalisation and interpretation of the chosen proxy. Therefore, it is considered that the error calculation used is solidly justified in the text and the uncertainty threshold finally chosen (± 0.3 m/year), which is the higher of those calculated for all of the dates and periods, is also consistent with the objective of obtaining comparable rates for the Atlantic and Mediterranean beaches. On the other hand, it is logical that the results obtained differ partly with the errors and rates calculated by other researchers in partial sectors of the area of study (mostly using water marks indicators, flights with different dates, several photo interpreters, other error calculations, etc.), but they are consistent with the methodology used and the objectives of this article: to calculate comparable rates for all of the exposed andalusian beaches, using the proxy that is best suited to the two façades (Atlantic and Mediterranean) of the area of study.

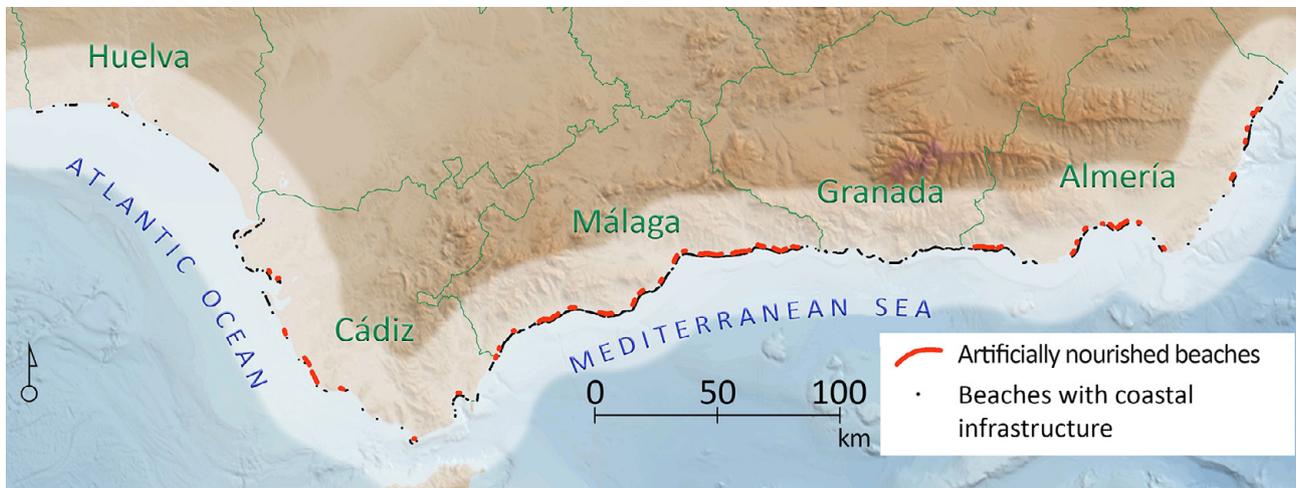
The results obtained for the overall time period for all of the exposed Andalusian beaches and the use of two internal time subperiods to evaluate the changes in trend are, therefore, clearly novel elements, as no data have been found in the scientific literature referring to all of the andalusian beaches (Atlantic and Mediterranean) for the overall time period analysed and with the chosen proxy. This proxy and the uncertainty threshold chosen, clearly and undeniably identify the sectors with regressive and prograding trends on the two façades. However, despite being the ideal indicator for evaluating behaviour in the medium and long term, there are limitations when analysing coastal sectors as the internal limits defined by the proxy are occupied by longitudinal infrastructures or constructions that prevent the retreat of the shoreline associated with them. This “rigidisation” of the shoreline, on the other hand, clearly masks erosive processes in these sectors due to the chosen proxy, which is why they have been classified as having a “stability forced by infrastructure”. The detailed identification of these sectors constitutes one of the principal results of the article. They are distributed along the whole coast, but mostly concentrated on the Mediterranean façade, for where previous studies have been published that relate the coastal erosion with the presence of infrastructures (Manno et al., 2016; Molina et al., 2019). The areas of study of these publications are found exclusively on this façade, where mostly the effects of the transversal infrastructures and their effect on the longitudinal sediment drift are analysed (breakwaters, dikes, etc.) based on rates calculated with a different proxy (water mark). Obviously, this is a different approach to the one used in this article, whose analysis is focused on the effects of longitudinal infrastructures and buildings (breakwaters, seafront promenades, buildings, etc.), which prevent the retreating processes and, therefore, the inward mobility of the proxy used in this article.

In this respect, in an attempt to focus on the idea that the presence of these longitudinal infrastructures and buildings on the shoreline mask the presence of erosive processes, the article analyses whether there is a relationship between the artificial nourishment occurring on the beaches on the Andalusian coast (generally associated with regressive sectors) and the location of these sectors that have “stability forced by longitudinal infrastructures”. To do this, the inventory of pressures on the different hydrographic basins has been used (rivers Tinto, Odiel and Piedras; Guadalete-Barbate; and Andalusian Mediterranean Basins), corresponding to the Hydrological Plan 2009-2015 (Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, 2015, 2017, 2021), available on the Andalusian Environmental Information Network (REDIAM) (Figure 11).

The findings show highly disparate results depending on the coast. On the Atlantic façade, an occasional yet clear relationship may be observed between the presence of these longitudinal infrastructures and the regeneration of beaches located mainly in the province of Cádiz. On the other hand, the relationship between the two variables is much greater on the Mediterranean façade, particularly the Costa del Sol of Málaga, where 65% of the regenerated Mediterranean beaches are concentrated and 54% of the regional total, according

to the source used. In all of these cases, it can be observed how the stabilisation of the shoreline with the construction of longitudinal infrastructures can mask serious erosive processes and, in the worst of cases, lead to a total loss of the beach as a natural and tourist resource, with the resulting damage to infrastructures, services and homes in the area.

Figure 11. Relationship between beaches with coastal infrastructures and artificially nourished beaches



Own elaboration

Undoubtedly, the results presented in this article add considerable value and differ from other more local or subregional studies (Del Río et al., 2013; Gong et al., 2012; Malvárez et al., 2019; Molina et al., 2019; Moore & Griggs, 2002; Stephenson et al., 2019), as they refer to the calculation of the rates for all of the exposed Andalusian beaches (620 km) with the proxy that is considered to best adapt to calculating the rates for mesotidal and microtidal sections of coast (the internal limit of the backshore). On the other hand, as it only uses one photo interpreter for the photointerpretation processes and the digitalisation rigorously uses a scale of 1:2500, the consistency of the comparisons between periods and façades is higher and the results significantly contribute to the knowledge of the erosive processes on Andalusian beaches.

5. Conclusions

From a methodological point of view, the proxy used has been found to be appropriate for medium and long-term studies as it lies outside the active profile of the beach and is slightly less affected by the changes of the foreshore due to the constant changes in the waves, tides or seasonal changes in the transverse profile, provided that the dates of the orthophotos are during calm periods (summer), as is the case of this study.

Similarly, the methodology proposed for the data generation, incorporating not only the geometry of the proxy (the shoreline) into a spatial database (PostgreSQL/PostGis), but also a whole set of thematic complementary variables (presence and type of infrastructures, geomorphological typology, presence of dunes, proximity of urbanisation, etc.) and subsequently, the data of the rates calculated (EPR, NSM, errors), constitutes the principal result of this study. In this respect, the complementary thematic variables of the data model have been critical in the classification processes of the different sectors and the interpretation of the results. Therefore, all of the results presented in this article are derived from this spatial database, which, in turn, provides the web client with its data (geovisor and widgets), developed in the CARTO platform, enabling the interactive exploration of the results on a detailed scale and the open access to their geovisualisation by any scientist. The facility to filter the data according to the user's wishes, the versatility for exploring them on different scales, the calculation in real time of the average rates on a regional level, by façade, by province, by municipality or any level of visualisation is another novel aspect and a methodological contribution that is interesting for the processes of interpreting the rates and dissemination on a detailed scale of the results.

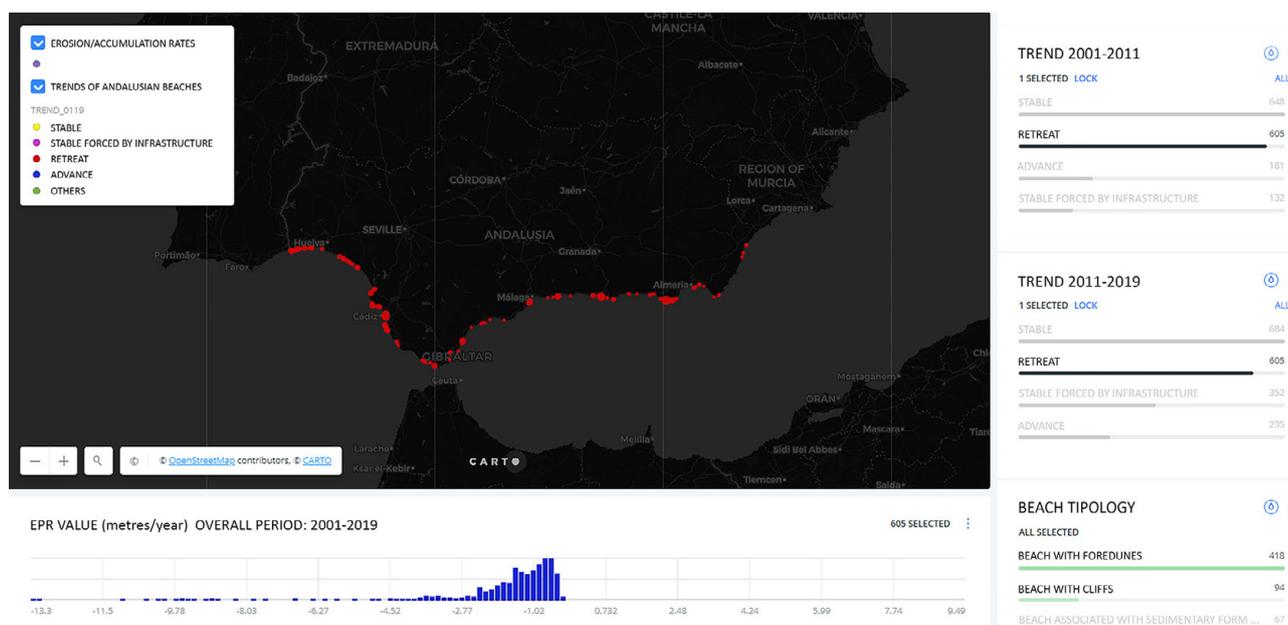
The results obtained, on the other hand, are highly sensitive to the proxy and the threshold of the level of uncertainty used after analysing the potential errors (± 0.3 m/year). This threshold is similar or slightly higher than that calculated in other publications for the area of study, but it is a high threshold and consistent with the objective sought to detect the sectors that are clearly regressive or progressive for all of the beaches of Andalusia and to facilitate a solid comparison of their rates by using the same proxy. The rates calculated for

the overall period show that the percentages for the clearly regressive (retreating) beaches is 13% with an average intensity values of -1.1 m/year and affecting 96 km of the ES, while those that have positive values (advances) account for 11%, with average intensity values of 1.4 m/year and affecting 72 km. The analysis by subperiod indicates small differences, with an increase of 2% of the prograding sectors and a reduction of the regressive sectors of around the same size (2%) in the most recent period, although half of them have increased the forced stable sectors due to the presence of infrastructures, revealing their regressive nature in the previous period.

The analysis by façade has revealed processes that were masked in the global data. First, there are more regressive sectors than accumulative sectors on both façades and in both cases (regressive and prograding) there is a greater percentage on the Atlantic beaches than the Mediterranean ones. The average intensity of the regressive rates, however, is higher on the Mediterranean coast (-1.3 m/year) than the Atlantic coast (-1.1 m/year). This situation is inverted in the accumulative processes in which the average values of the advance rates on the Atlantic (1.6 m/year) are much higher than those of the Mediterranean (0.9 m/year). The paradox that explains these differences (length/intensity) is another conclusion of the study. This paradox shows a clear weakness of the chosen proxy (and of all those that use fluctuations of the shoreline) as it does not incorporate the altimetric variable. Therefore, the intensity of the erosive processes on the Atlantic façade, although lower than that of the Mediterranean, mask the volume of sediments really eroded, as they are associated with dune systems and cliffs on soft materials, sometimes with a great height (the El Asperillo cliff, for example). Although they slow down the retreating processes of the coast and have low values of intensity, in reality they indicate high volumes of eroded sediments that are incorporated into the coastal system that are higher than other regressive sectors of the Mediterranean coast affected by sedimentary formations with a lower height.

Another conclusion derived from the results is the large area of stable sectors, which, for the overall period, account for 76 % of the beaches, although, due to the chosen proxy, a significant number of them (30%) belong to the so-called sectors with “stability forced by longitudinal infrastructures or buildings” that prevent the shoreline from migrating inland. The vast majority are on the Mediterranean façade where the stable sectors account for 86% and, within these, the stable sectors forced by infrastructure represent almost 46%. This reveals, on the one hand, the strong anthropisation of the Mediterranean coast and, on the other hand, a masking of the dominant erosive processes in these areas, which, due to the presence of anthropic constructions, would be the most vulnerable areas where protection measures have been previously required (walls, breakwaters, etc.).

Figure 12. Transects of Andalusian beaches that display a regressive behaviour in the two subperiods (2001-2011 and 2011-2019)



Finally, the analysis conducted on the change in trends between the two subperiods and façades constitutes another novel result of this article, revealing the high spatial dynamism of the erosion processes on the

Andalusian coast. The web client developed constitutes a magnificent complement to the graphic results presented in this article as it enables the data to be filtered and the number of transects and average intensity of the rates of the filtered sectors to be calculated in real time. By way of example, if the data of the first period are filtered and only the regressive sectors are selected in the widget (Figure 12), we can observe towards which type of behaviour they have evolved in the second period. If, in addition to this filter, another is applied within widget of the second period, and the sectors with a regressive (retreating) trend are marked, those sectors subjected to a greater exposition of persistent erosion over time may be identified, as they have maintained the same trend in the two periods. The result obtained (Figure 12) is that these sectors account for 30 km of the beaches on the Andalusian shoreline (with an average intensity of -1.79 m/year), of which 20 km are located on the Atlantic coast (with an average intensity of -1.5 m/year) and 10 km on the Mediterranean coast, whose average intensity in regressive rates is double (-2.44 m/year).

Funding

The authors gratefully acknowledge funding from: “Infraestructuras científicas para la vigilancia y adaptación al cambio global en Andalucía” (INDALO-2); “Prototipo Cloud de Evaluación de Riesgos a Través de la Integración Espacial de Geodatos (Grid Multiescalares) y Clientes Web (Dashboard) para su Gestión y Medidas de Adaptación” (PID2019-106834RB-I00); “Cloudrisk_A: E-Infraestructura (Cloud Computing) para la Integración Espacial de Variables Antrópicas en el Cálculo de la Vulnerabilidad ante Riesgos Costeros y Herramientas Web (DASHBOARD) para su Gestión en Andalucía” (P18-FR-2574); and forms part of the project linked to the international research group “IGCP 725 Forecasting Coastal Change” of UNESCO.

References

- Aguilar, F. J., Fernández, I., Aguilar, M. A., & García Lorca, A. M. (2018). Assessing shoreline change rates in Mediterranean beaches. *Beach Management Tools-Concepts, Methodologies and Case Studies*, 219-237. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58304-4_11
- Aguilar, F. J., Mills, J. P., Delgado, J., Aguilar, M. A., Negreiros, J. G., & Pérez, J. L. (2010). Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1), 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.09.003>
- Alicandro, M., Baiocchi, V., Brigante, R., & Radicioni, F. (2019). Automatic shoreline detection from eight-band VHR satellite imagery. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(12), 459. <https://doi.org/10.3390/jmse7120459>
- Almonacid-Caballer, J., Sánchez-García, E., Pardo-Pascual, J. E., Balaguer-Beser, A. A., & Palomar-Vázquez, J. (2016). Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*, 372, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.12.015>
- Anfuso, G., Dominguez, L., & Gracia, F. J. (2007). Short and medium-term evolution of a coastal sector in Cadiz, SW Spain. *Catena*, 70(2), 229-242. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.09.002>
- Apostolopoulos, D. N. & Nikolakopoulos, K. G. (2020). Assessment and quantification of the accuracy of low- and high-resolution remote sensing data for shoreline monitoring. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 391. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060391>
- Bera, R. & Maiti, R. (2019). Quantitative analysis of erosion and accretion (1975–2017) using DSAS—A study on Indian Sundarbans. *Regional Studies in Marine Science*, 28, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100583>
- Bird, E.C. (2011). *Coastal geomorphology: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Boak, E.H. & Turner, I.L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research* 21(4), 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Casella, E., Drechsel, J., Winter, C., Benninghoff, M., & Rovere, A. (2020). Accuracy of sand beach topography surveying by drones and photogrammetry. *Geo-Marine Letters*, 40, 255–268. <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00638-8>
- Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía (2015). *Inventario Presiones demarcación hidrográfica Guadalete-Barbate: regulación de flujo y alteraciones morfológicas (PH 2009-2015)* [Recurso WMS]. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_regulacion_flujo_GB?
- Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía (2017). *Inventario Presiones demarcación hidrográfica Tinto, Odiel y Piedras: regulación de flujo y alteraciones morfológicas (PH 2009-2015)* [Recurso WMS]. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_regulacion_flujo_TOP_2009_2015?
- Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía (2021). *Inventario Presiones demarcación hidrográfica Cuencas Mediterráneas Andaluzas: regulación de flujo y alteraciones morfológicas (PH 2009-2015)* [Recurso WMS]. https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/mapwms/REDIAM_regulacion_flujo_MED?
- Del Río, L. & Gracia, F. J. (2013). Error determination in the photogrammetric assessment of shoreline changes. *Natural hazards*, 65, 2385-2397. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0407-y>
- Del Río, L., Gracia, F.J., & Benavente, J. (2013). Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*, 196, 252-266. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.027>
- Díaz-Cuevas, P., Prieto-Campos, A., Fraile-Jurado, P., Ojeda-Zujar, J., & Álvarez-Francoso, J. I. (2020). Shoreline” Proxies” Evaluation for Mid-term Erosion Rates Calculation in Mesotidal and Microtidal Beaches (Andalusia, Spain). *Journal of Coastal Research*, 95(SI), 1062-1066. <https://doi.org/10.2112/SI95-207.1>

- Di Paola, G., Rodríguez, G., & Roszkopf, C. M. (2020). Short-to mid-term shoreline changes along the southeastern coast of Gran Canaria Island (Spain). *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 31, 89-102. <https://doi.org/10.1007/s12210-020-00872-3>
- Espinosa-Montero, V., & Rodríguez-Santalla, I. (2009). Evolución costera del tramo comprendido entre San Juan de los Terrenos y Playas de Vera (Almería). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22(1-2), 3-12.
- Esteves, L. S., Williams, J. J., Nock, A., & Lymbery, G. (2009). Quantifying shoreline changes along the Sefton coast (UK) and the implications for research-informed coastal management. *Journal of Coastal Research*, si(56), 602-606. <https://www.jstor.org/stable/25737648>
- Fernandez-Nunez, M., Díaz-Cuevas, P., Ojeda, J., Prieto, A., & Sánchez-Carnero, N. (2015). Multipurpose line for mapping coastal information using a data model: the Andalusian coast (Spain). *Journal of Coastal Conservation*, 19, 461-474. <https://doi.org/10.1007/s11852-015-0400-1>
- Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N., & Rooney, J. J. (2007). The predictive accuracy of shoreline change rate methods and alongshore beach variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 23(1), 87-105. <https://doi.org/10.2112/05-0521.1>
- Georgiou, S. & Turner, R.K. (2008). *Valuing ecosystem services: the case of multi-functional wetlands*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849773706>
- Goble, B. J. & MacKay, C. F. (2013). Developing risk set-back lines for coastal protection using shoreline change and climate variability factors. *Journal of Coastal Research*, (65), 2125-2130. <https://doi.org/10.2112/SI65-359.1>
- Gong, Z., Wang, Z., Stive, M.J.F., Zhang, C., & Chu, A. (2012). Process-based morphodynamic modeling of a schematized mudflat dominated by a long-shore tidal current at the central Jiangsu coast, China. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1381-1392. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-12-00001.1>
- Gracia, F. J., Anfuso, G., Benavente, J., Río, L. D., Domínguez, L., & Martínez, J. A. (2005). Monitoring coastal erosion at different temporal scales on sandy beaches: application to the Spanish Gulf of Cadiz coast. *Journal of Coastal Research*, 22-27. <http://www.jstor.org/stable/25737399>
- Guisado-Pintado, E. & Malvárez, G. (2015). El rol de las tormentas en la evolución morfodinámica del Delta del río Vélez: Costa del Sol, Málaga. In *Geo-Temas; Sociedad Geológica de España* (vol. 15, pp. 189-192).
- Guisado-Pintado, E. & Jackson, D.W.T. (2020). Monitoring Cross-shore Intertidal Beach Dynamics using Oblique Time-lapse Photography. *Journal of Coastal Research*, 95(sp1), 1106-1110. <https://doi.org/10.2112/SI95-215.1>
- Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., & Farris, A.S. (2021). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2021-1091, 104 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>
- Kabuth, A.K., Kroon, A., & Pedersen, J.B. (2014). Multidecadal shoreline changes in Denmark. *Journal of Coastal Research*, 30(4), 714-728. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00139.1>
- Komar, P.D. (2018). Beach processes and erosion—an introduction. In *CRC Handbook of coastal processes and erosion* (pp. 1-20). CRC Press.
- Komar, P.D. & Holman, R.A. (1986). Coastal processes and the development of shoreline erosion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1), 237-265. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.001321>
- Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., & Aarninkhof, S. (2018). The state of the world's beaches. *Scientific reports*, 8(1), 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Malvárez, G., Navas, F., Guisado-Pintado, E., & Jackson, D. W. (2019). Morphodynamic interactions of continental shelf, beach and dunes: The Cabopino dune system in southern Mediterranean Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(8), 1647-1658. <https://doi.org/10.1002/esp.4600>
- Manno, G., Anfuso, G., Messina, E., Williams, A. T., Suffo, M., & Liguori, V. (2016). Decadal evolution of coastline armouring along the Mediterranean Andalusia littoral (South of Spain). *Ocean & Coastal Management*, 124, 84-99. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.02.007>

- Mentaschi, L., Vousedoukas, M.I., Pekel, J.F., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2018). Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, 8, 12876. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). (2013). *Estudio ecocartográfico del litoral de la provincia de Cádiz*. Dirección General de la Sostenibilidad de la Costa y el Mar.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). (2009). *Estudio ecocartográfico del litoral de las provincias de Granada, Almería y Murcia*. Dirección General de la Sostenibilidad de la Costa y el Mar.
- Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (MTMS). (29 de noviembre de 2023). *Puertos del Estado. Datos históricos del oleaje*. <https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>
- Molina, R., Anfuso, G., Manno, G., & Gracia, F.J. (2019). The Mediterranean coast of Andalusia (Spain): Medium-term evolution and impacts of coastal structures. *Sustainability*, 11, 3539. <https://doi.org/10.3390/su11133539>
- Moore, L. J. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal of coastal research*, 111-124. <https://www.jstor.org/stable/4300016>
- Moore, L.J. & Griggs, G.B. (2002). Long-term cliff retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, 181(1-3), 265-283. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00271-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00271-7)
- Moore, L. J., Ruggiero, P., & List, J. H. (2006). Comparing mean high water and high water line shorelines: should proxy-datum offsets be incorporated into shoreline change analysis? *Journal of Coastal Research*, 22(4), 894-905. <https://doi.org/10.2112/04-0401.1>
- Morton, R.A., Miller, T.L., & Moore, L.J. (2004). *National Assessment of shoreline change: Part 1 historical shoreline changes and associated coastal land loss along the U.S. Gulf of Mexico*. Open-file Report. <https://doi.org/10.3133/ofr20041043>
- Obu, J., Lantuit, H., Grosse, G., Günther, F., Sachs, T., Helm, V., & Fritz, M. (2017). Coastal erosion and mass wasting along the Canadian Beaufort Sea based on annual airborne LiDAR elevation data. *Geomorphology*, 293, 331-346. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.014>
- Ojeda-Zújar, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 30, 103-118.
- Pardo-Pascual, J. E., Sánchez-García, E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J. M., Priego De Los Santos, E., Fernández-Sarría, A., & Balaguer-Beser, A. (2018). Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 326. <https://doi.org/10.3390/rs10020326>
- Paris, P., Starek, M.J., Hardin, E., Kurum, O., Overton, M., & Mitasova, H. (2013). Lines in the sand: Geomorphic and Geospatial characterization and interpretation of sandy shorelines and beaches. *Geography Compass* 7(5), 315-343. <https://doi.org/10.1111/gec3.12041>
- Pérez-Alberti, A., Pires, A., Freitas, L., & Chaminé, H. (2013, September). Shoreline change mapping along the coast of Galicia, Spain. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, 166(3), 125-144. <https://doi.org/10.1680/maen.2012.23>
- Prieto-Campos, A. (2017). *Metodología para el cálculo, explotación y difusión de líneas de costa y tasas de erosión a medio plazo (1956-2011) en Andalucía* [Unpublished Doctoral Thesis]. Universidad de Sevilla.
- Prieto-Campos, A., Díaz-Cuevas, P., Fernandez-Nunez, M., & Ojeda-Zújar, J. (2018a). Methodology for improving the analysis, interpretation, and geo-visualisation of Erosion Rates in coastal beaches—Andalusia, Southern Spain. *Geosciences*, 8(9), 335. <https://doi.org/10.3390/geosciences8090335>
- Prieto-Campos, A., Díaz-Cuevas, P., Ojeda-Zújar, J., & Pérez-Alcántara, J. P. (2018b). Relational spatial databases for the study of erosion rates and the accommodation space in the coast of Andalusia. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 12678).
- Prieto-Campos, A., Díaz-Cuevas, M. D. P., & Ojeda Zújar, J. (2019). 'Accommodation space' at beaches in Andalusia: calculations derived from the 2013 shoreline data model and the use of spatial databases.

- Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 23, 97-117. <https://doi.org/10.21138/GF.628>
- Pye, K. & Blott, S. J. (2016). Assessment of beach and dune erosion and accretion using LiDAR: Impact of the stormy 2013–14 winter and longer term trends on the Sefton Coast, UK. *Geomorphology*, 266, 146-167. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.011>
- Quang, D.N., Ngan, V.H., Tam, H.S., Viet, N.T., Tinh, N.X., & Tanaka, H. (2021). Long-term shoreline evolution using dsas technique: A case study of Quang Nam province, Vietnam. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1-18. <https://doi.org/10.3390/jmse9101124>
- Ramsay, D.L., Gibberd, B., Dahm, J., & Bell, R.G. (2012). *Defining coastal hazard zones and setback lines. A guide to good practice*. National Institute of Water & Atmospheric Research Ltd, Hamilton, New Zealand.
- Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. *Boletín Oficial del Estado*, 207, de 29 de agosto de 2007, pp. 35986-35989. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/07/27/1071>
- Rodríguez-Santalla, I., Gomez-Ortiz, D., Martín-Crespo, T., Sánchez-García, M. J., Montoya-Montes, I., Martín-Velázquez, S., Barrio, F., Serra, J., Ramírez-Cuesta, J. M., & Gracia, F. J. (2021). Study and Evolution of the Dune Field of La Banya Spit in Ebro Delta (Spain) Using LiDAR Data and GPR. *Remote Sensing*, 13(4), 802. <https://doi.org/10.3390/rs13040802>
- Sánchez-Carnero, N., Ojeda-Zújar, J., Rodríguez-Pérez, D., & Márquez-Pérez, J. (2014). Assessment of different models for bathymetry calculation using SPOT multispectral images in a high-turbidity area: The mouth of the Guadiana Estuary. *International Journal of Remote Sensing*, 35(2), 493-514. <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871402>
- Stephenson, W.J., Kirk, R.M., & Hemmingsen, M.A. (2019). Forty three years of micro-erosion meter monitoring of erosion rates on shore platforms at Kaikōura Peninsula, South Island, New Zealand. *Geomorphology*, 344, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.07.012>
- Terefenko, P., Paprotny, D., Giza, A., Morales-Nápoles, O., Kubicki, A., & Walczakiewicz, S. (2019). Monitoring cliff erosion with LiDAR surveys and Bayesian network-based data analysis. *Remote Sensing*, 11(7), 843. <https://doi.org/10.3390/rs11070843>
- Thinh, N.A. & Hens, L. (2017). A Digital Shoreline Analysis System (DSAS) applied on mangrove shoreline changes along the Giao Thuy coastal area (Nam Dinh, Vietnam) during 2005-2014. *Science of the Earth*, 39(1), 87-96. <https://doi.org/10.15625/0866-7187/39/1/9231>
- Viaña-Borja, S.P. & Ortega-Sánchez, J. (2019). Automatic methodology to detect the coastline from landsat images with a new Water Index assessed on three different Spanish Mediterranean deltas. *Remote Sensing*, 11, 2186. <https://doi.org/10.3390/rs11182186>
- Viciano, A. (2001). *Erosion costera en Almería 1957-1995*. Instituto de Estudios Almerienses, Diputación de Almería.
- Vila, J. & Varga, D. (2008). Los Sistemas de Información Geográfica. In P. Andrés & R. Rodríguez (Eds.), *Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica* (pp. 357-376). Documentación Universitaria.
- Von Meyer, N., Foote, K.E., & Huebner, D.J. (1999). Information quality considerations for coastal data. In *Marine and coastal geographical information systems* (pp. 341-356). CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780203484739>

Landscape through graphic representation: Augmented Reality as a tool for interpretation

El paisaje a través de la representación gráfica: la Realidad Aumentada como herramienta de interpretación

AUTHORSHIP

Felipe Fernández García 

ARPE-Observatorio del Territorio Accredited Research Group. Department of Geography. University of Oviedo. Spain.

Daniel Herrera Arenas 

ARPE-Observatorio del Territorio Accredited Research Group. Department of Geography. University of Oviedo. Spain.

Juan Sevilla Álvarez 

ARPE-Observatorio del Territorio Accredited Research Group. Department of Geography. University of Oviedo. Spain.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25511>

CITATION

Fernández García, F., Herrera Arenas, D., & Sevilla Álvarez, J. (2024). Landscape through graphic representation: Augmented Reality as a tool for interpretation. *Investigaciones Geográficas*, (81), 33-50. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25511>

CORRESPONDENCE

Juan Sevilla Álvarez (sevillaajuan@uniovi.es)

HISTORY

Received: 2 July 2023
Accepted: 31 December 2023
Published: 26 January 2024

TERMS

© Felipe Fernández García, Daniel Herrera Arenas and Juan Sevilla Álvarez

 This work is published under a license Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Abstract

Within a sociocultural context where visual components are becoming increasingly important and new technologies are spreading, geography must adapt to new demands, avoid trivialization in the use of images, and approach the task of creating graphic elements based on an effective and rigorous transmission of knowledge. Considering Augmented Reality as an advantageous technology due to the interactive, self-guided and dynamic nature of its tools, this research seeks to prove its effectiveness and determine the main benefits derived from its application in the representation of landscapes. The methodology takes as its starting point basic graphic materials, most of which are already known in landscape studies. Procedures based on new computer techniques are applied to these materials in order to obtain digital resources compatible with Augmented Reality and Virtual Reality. These resources can be integrated into more complex tools that help explain the composition and dynamics of landscapes. Thus, the figures presented in this article are accompanied by a web link and also incorporate a hyperlink, so that by clicking on them, the aforementioned resources are accessed. And those figures with the Observatorio del Territorio (OT) logo are image markers in themselves that allow Augmented Reality content to be opened on devices. The results are obtained by testing various forms of multimedia representation in the context of an R&D project with application in various urban, rural and natural areas of the Principality of Asturias. These are hosted on the server of the Observatorio del Territorio at the University of Oviedo. The conclusions indicate the beneficial use of dynamic sequences (animations, sliders...) for a better understanding of diachronic changes; the interactive third dimension for the representation of complex elements; or the general added value of combining information on media (audio, video, 360° panoramas, etc.) in the understanding of shapes and structures.

Keywords: landscape representation; Geographical Information Technologies (GIT); emerging tools; Augmented Reality; territorial culture; landscape awareness.

Resumen

En un contexto sociocultural donde los componentes visuales cobran cada vez más importancia y las nuevas tecnologías se difunden, la Geografía debe adaptarse a las nuevas exigencias, evitar la banalización en

el uso de las imágenes y abordar la tarea de crear elementos gráficos que permitan una transmisión eficaz y rigurosa del conocimiento. Considerando la Realidad Aumentada como una tecnología ventajosa por el carácter interactivo, auto-guiado y dinámico de sus herramientas, esta investigación tiene como objetivo probar su efectividad y mostrar los principales beneficios derivados de su aplicación en la representación del paisaje. La metodología toma como punto de partida materiales gráficos de base, la mayor parte de los cuales son ya conocidos en los estudios del paisaje. Sobre estos materiales se aplican procedimientos basados en nuevas técnicas informáticas que permiten obtener recursos digitales compatibles con la Realidad Aumentada y la Realidad Virtual. Estos recursos pueden ser integrados en herramientas más complejas que ayudan a explicar la composición y dinámica de los paisajes. Así, las figuras presentadas en este artículo se acompañan de un enlace web e incorporan, además, un hipervínculo, de manera que al hacer clic sobre ellas se accede a los recursos mencionados. Aquellas figuras con el logo del Observatorio del Territorio (OT) constituyen marcadores de imagen en sí mismos que permiten abrir contenidos de Realidad Aumentada en los dispositivos. Los resultados provienen de probar varias formas de representación multimedia en el contexto de un proyecto de I+D con aplicación en diversas áreas urbanas, rurales y de dominante natural del Principado de Asturias. Estos se alojan en el servidor del Observatorio del Territorio de la Universidad de Oviedo. Las conclusiones subrayan el uso beneficioso de secuencias dinámicas (animaciones, comparadores de fechas con cortinilla deslizante...) para una mejor comprensión de los cambios; la tercera dimensión interactiva para la representación de elementos complejos; o el valor añadido general de combinar información de soportes (audio, vídeo, panorámicas 360°, etc.) en la comprensión de formas y estructuras.

Palabras clave: representación del paisaje; Tecnologías de la Información Geográfica (TIG); herramientas emergentes; Realidad Aumentada; cultura territorial; conciencia paisajística.

1. Introduction

The development and application of tools based on new technologies (Information and Communication Technologies) is becoming a resource with an extraordinary capacity to transmit information. Within these new technologies, Augmented Reality, understood as the combination of virtual elements in the real world, begins to be used in more and more areas such as Geography. In this sense, landscape studies constitute a field of great interest for a wide range of users, going from individuals, with the simple aspiration of enjoying landscapes or understanding the basic linked processes, to professionals, who need to know their composition and evolution in detail to carry out tasks related to their research and technical activities.

In a society with an overexposure to the visual (Mirzoeff, 2003), geography must avoid the trivialization in the use of images, giving them the importance that they deserve in the tasks of creation/selection of graphic elements, as a key to the academic process. In this process, it is essential to understand that “the production of any image involves tasks of a conceptual, technical and aesthetic order” (Hollman, 2008, 2016). In this sense, the visual perception lays the groundwork of concept formation (Arnheim, 1997). Therefore, the elaboration of graphic representations constitutes a fundamental mission within geographical science to which special attention should be paid, so that we can take advantage of all the opportunities that visual ability offers to improve teaching and research (Thornes, 2004). The development of Geovisualization, as result of linking cartography and scientific visualization (Dodge et al., 2008), increase the possibilities of geographical representations so they can be interactive, immersive and three-dimensional. In fact, it provides many Augmented Reality and Virtual reality possibilities to be exploited (Kraak 2020; Ortag 2012).

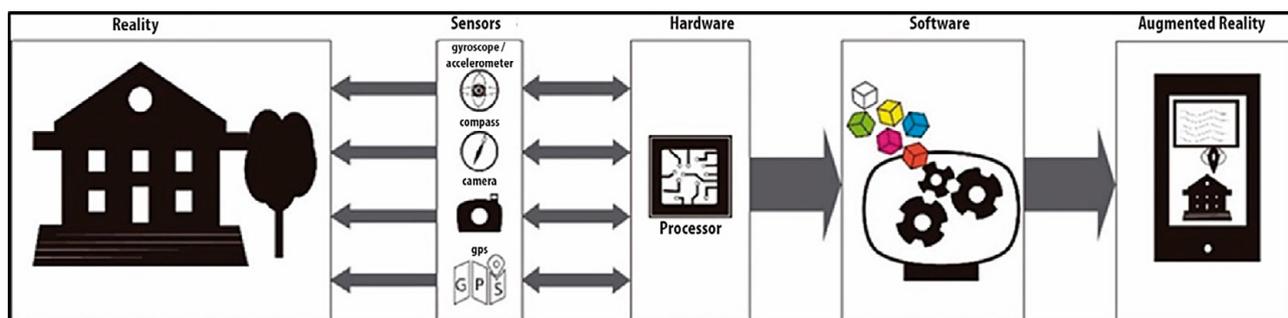
The combination of formats, the use of multimedia materials and three-dimensional elements, and interactivity constitute facts within today's society. Therefore, these are new communication formulas to be assumed, just as other representation techniques were incorporated in the past as a result of technological advances (Geographic Information Systems, automated mapping, etc.). However, it is necessary to adapt the visual language to the target audience and their new communication channels. Hence, application design based on Augmented Reality is among the technologies to test in order to offer new experiences of understanding the composition and transformations of landscape by digital information through devices. So tools can be downloaded and ran on mobile devices which are widely used, such as tablets or smartphones, allowing the combination of real and virtual elements through the use of markers, or by geopositioning, and benefiting from sensors available in these devices: GPS, cameras, compasses, gyroscopes, accelerometers, etc.

Faced with Virtual Reality technologies (whose spatial context is constructed with computerized procedures), this work opts for Augmented Reality to obtain advantages from the visualization of elements of the real world, either directly or indirectly, in combination with superimposed virtual elements through the use of devices (Carbonell

Carrera & Bermejo Asensio 2017a, 2017b; Chang et al., 2010; Cobo and Moravec, 2011). We wish to facilitate integrated knowledge, combining the environment of reality with enriching digital information in real time through the use of technological platforms that favour learning and understanding of concepts and processes.

Augmented Reality requires at least 4 components (Kipper & Rampolla, 2013) that make possible to combine digital resources on a real image or element: on the one hand, the sensors that allow to capture data from the environment and the position of the device (camera, gyroscope, accelerometer, compass, GPS ...); second, a system for storing and processing information; third, a software that combines the information; and, finally, a display device, either the device's own screen or others such as the Head Mounted Display type (HMD) (Figure 1). In order for the augmented virtual information to be activated on the display device, a marker is required to trigger the digital resources. Then, taking into account a utility linked to the explanation of landscape, texts, images, animations, videos, audios, 3D elements and links to applications or external resources, etc. constitute basic elements to enrich information.

Figure 1. Components of Augmented Reality



Source: Olay Varillas et al. (2019)

Due to the speed at which these technologies evolve, it is difficult to establish a classification that encompasses all the varieties and possibilities. However, we can use the one established by Lens-Fitzgerald (2009) in which four types of Augmented Reality (Peddie, 2017) are differentiated according to interactivity, complexity and the type of activator. They indeed have distinct advantages for landscape experiences.

The first type is based on hyperlinks activated by barcodes or QR (Quick Response) markers detected by the sensor (camera), this type being characterized by low interactivity, since its function is limited to linking to a website where the extended information is hosted. Such triggers are useful because of their widespread use, especially in outdoor environments, but they have the disadvantage of weak integration between digital and real elements.

The second type is based on the use of image markers or 3D objects, the activation also being carried out by the sensor; this type implies a greater degree of interaction, since there is a link between the activator and the virtual information integrated and superimposed on reality¹. They are particularly useful to complement the information available in brochures or printed items, but they could require a specific application or webAR.

In the third type, markers are not used, but the activation is carried out with various sensors integrated in mobile devices (GPS, compass, accelerometer, gyroscope ...). It may present difficulties depending on the sensitivity and precision of the devices, but it allows for self-guidance in open spaces, offering additional information based on the user's position. By means of these activators it is possible to carry out itineraries in which the explanation is directly linked to our position so it is therefore spatially contextualised.

There is a fourth type in which Augmented Reality no longer depends on a screen but it becomes an immersive vision through glasses or other HMD devices (*Head Mounted Display*). However, this type is not sufficiently developed today to offer comfort and safety in open spaces and therefore the use in explaining landscape does not seem relevant to us.

These types can be used in a complementary way integrating them in the same application. For example, in the case of designing a route or itinerary (Sánchez Verdú et al., 2014) where it is included: a guide (in a digital or paper format) that would contain markers; the location of QR codes or image markers through posts or beacons that would serve as links to high-capacity alphanumeric information; and, finally, geolocation (through ge-positioning or activated by beacons) that would grant access to information at certain points along the route.

¹ The quality of the image that triggers Augmented Reality as a marker is important. Quality implies not only a good resolution, but also aspects such as contrast, the number of lines, changes in texture, etc. Thus, the more visual details a marker has, the better its performance.

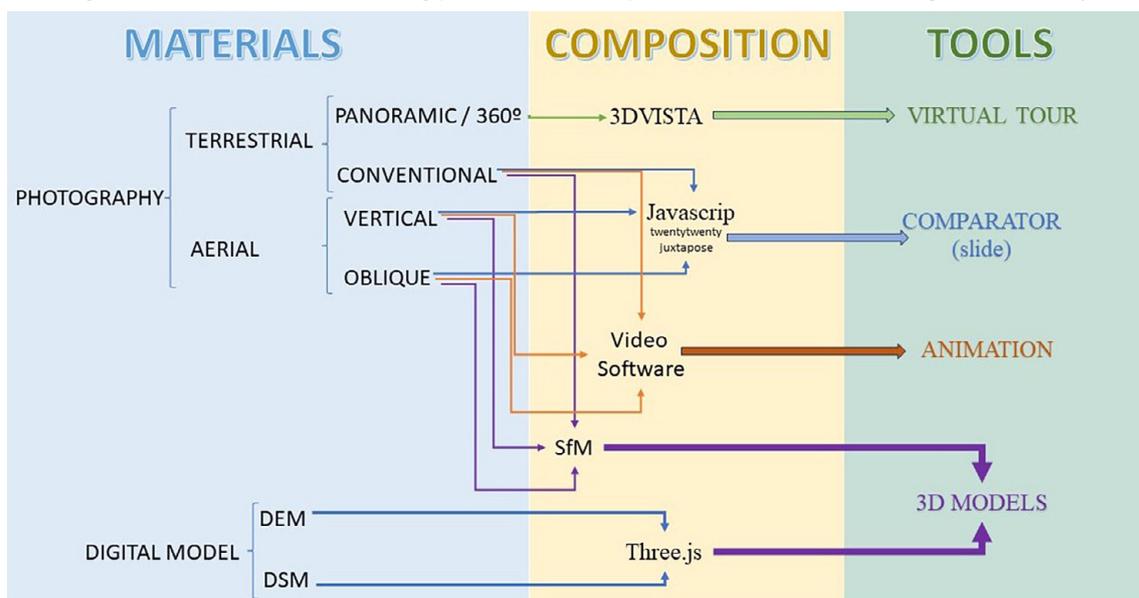
All these characteristics making Augmented Reality a tool with significant potential in the field of Geography, however it is necessary “that future research also provide a better knowledge for its effective application” (Akçayır & Akçayır, 2017; Chiang et al., 2014; Cheng & Tsai, 2013; Falk & Chatel 2017). Some authors have analysed the possibilities of Augmented Reality especially in the educational field. In most cases, their studies have proposed applications for specific purposes in Geography teaching: composition of specific itineraries for understanding the evolution of landscapes (Sánchez Verdú et al., 2014), 360° images for experience locations (Prisille & Ellerbrake, 2020; Stojšić et al., 2016) or three-dimensional models to improve learners’ orientation skills and understanding of structures (Carbonell Carrera & Bermejo Asensio, 2017a; Pratama et al., 2021). Besides, Stintzing et al. (2020) have tested gamified environmental experiences using an Augmented Reality geo-localised application.

Based on this research axis, our work proposes the following hypothesis: the interactive, auto-guided and dynamic character of Augmented Reality tools is beneficial for representing the distinctive features of landscapes due to the nature of the source materials, the form of activation and the dynamic effects (Damala et al., 2008; Marques et al., 2019); it facilitates the interpretation of forms and structures as well as shows their dynamics, underlining the diachronic dimension, by showing the action over time of the underlying natural and human processes. This vision underlined in our work is related to the postulates of the European Landscape Convention (signed in Florence, 2000), which has been of vital importance for the approach, understanding and enjoyment of landscapes by the population. Landscape analysis must matter as an object of interest in the learning process about geographical space and its cultural values (Alomar-Garau & Gómez Sotano, 2022; Olcina Cantos et al., 2022); what Ortega y Gasset (1906) expressively called landscape pedagogy, being present in the fields of humanities, social sciences or the environment (Busquets, 2010; García, 2011; Hernández 2010; Licerias, 2013). Consequently, the objective of the research is designing and proving the effectiveness of a repertoire of tools that could articulate landscape interpretation experiences. It is estimated that these tools could support an increase in effectiveness related to the visual component or interactivity due to more direct and intuitive intervention; note those cases with greater possibilities of handling by including buttons and labels that trigger other processes with pop-up information. They are conceived to obtain information that is not accessible with the same immediacy in other media formats (Eve, 2012).

2. Methodology

The methodology of our research is based on conceiving the sequence materials - techniques – applications (Figure 2). It involves the detailed and in-depth knowledge of the characteristics of materials or sources that can be used. Likewise, attention is paid to the adaptation of representation forms in order to achieve the most of the capabilities provided by new graphic techniques. Besides, interest is directed to the conception of applications in which the interpretation of landscapes is adapted to the media and demands of current users.

Figure 2. Workflow scheme showing procedure for composition of tools based on Augmented Reality



Own elaboration

2.1. The choice of graphic materials

There are many graphic materials that can be used for the development of Augmented Reality applications. As it has been pointed out previously, the options have been multiplying (videos, audios, photographs, maps, three-dimensional models, diagram blocks, etc.); however, the focus here is on the use of photography and the creation of slider comparators, three-dimensional models and virtual tours², trying to illustrate their importance as geographic documents and how to use them as Augmented Reality resources.

Terrestrial photography was early in countries such as France or the United States, where the method of repeated photography was used to analyse transformations in landscape³; a task that French foresters began at the end of the 19th century, and which North American researchers continued from the sixties of the last century (Carré & Metallié, 2008; Rogers & Malde, 1984). The use of terrestrial photography in Spanish geography has, on the contrary, been late and less systematic, which has surely had to do with the fact that the available photographic collections were not abundant until recent years. And its usefulness in the analysis of the dynamics of landscapes contrasts, however, with their limited application. They do allow in many cases to make diachronic analyses, using the method of repeated photography (Carré & Metallié, 2008). In this method, while not keeping exactly the same point of view between the contrasting images, they show the perspectives of the same landscape at different dates, with very interesting results when a good photo interpretation task is done.

As for the aerial photography, whose origin dates back to the central years of the 19th century, its true documentary value is reached from the moment in which flights are carried out systematically and with coverage of wide sectors of the territory. This means that, in the photographic archives, public and private, there is an important volume of vertical and oblique aerial images for working with the techniques of photointerpretation (Fernández García, 1998; Fernández García & Quirós Linares, 1997).

For the use of vertical aerial images in the historical analysis of the landscape, it is convenient to identify the temporal perspective with which the analysis is going to be made. On the one hand, there are aerial images to analyse those processes that were developed before the birth of aerial photography, but that have left some mark on the landscape and, therefore, can be recognized and interpreted in the photographs or, at least, in a part of them; and, on the other hand, we can distinguish the images that illustrate “contemporary” historical processes, those that were developed over the last decades and, therefore, are documented photographically in their different stages of evolution.

Oblique aerial photographs, old or new, are another interesting material in photointerpretation tasks, as well as an important complement to vertical aerial photography. Oblique aerial imaging had a great development in the early days of air navigation (both in the ballooning stage and in the early stages of aviation). Afterwards, oblique views have been taken throughout the 20th century (although to a lesser extent than vertical aerial photographs). In this way, there are photographic archives, also public and private, that have extremely useful content for studies of landscapes and their dynamics.

Another kind of base materials are 3 dimensional models. Among these, there are Digital Elevation Models (DEM) and Digital Surface Models (DSM), specially those provided by the Spanish National Geographic Institute-CNIG (models with different resolutions, ranging from 200 to 2 meters mesh, being also possible to have 2x2 km Lidar data, with a density of 0.5 points per square meter, with which very precise digital models can be elaborated). On the other hand, there are photogrammetric models obtained from ground and/or aerial photography.

2.2. Composing dynamic figures

One of our main methodological purposes has been the integration of photography in new processes that improve graphic quality and generate new forms of dynamic and interactive representation. However, these new forms of representation also have certain requirements.

² Although it is closer to what we know as Virtual Reality, we use it because the virtual tour can be deployed using Augmented Reality technology, with markers or positioning. And it is a suitable complement to other graphic resources.

³ As opposed to repeated photography, for which a reliable methodological support is available (Carré & Metallié, 2008), and which essentially consists of the use of historical terrestrial photographs from archives and current photographs taken expressly from a point of view as close as possible to the old photo, comparative photography is considered to be the procedure consisting of making a comparison between aerial, vertical or oblique photographs taken on different dates, obtained in all cases in photo libraries.

Regarding a first type of composite tools, that of comparators (Figures 3 and 4), historical photographs can be used to create series. Traditionally, the analysis of photographs was done by contrasting one with the other in the form of a static image. Today, devices allow us to compare more than two images dynamically and interactively. However, it is necessary to eliminate the deformations of the photographs (due to the type of projection, among other aspects), obtaining rectified historical images or historical orthophotomaps. Thus, it is feasible to insert them into Geographic Information Systems (GIS) and combine and compare them with the series of recent and current orthoimages.

When using aerial photography, a difficulty derives from the fact that, in order to have current images with the same point of view as the historical ones, it is necessary to perform specific flights for this purpose. This involves very high costs, which can only be reduced in some cases by using Unmanned Aerial Vehicles (Commonly known as DRONES). However, in some areas it is not possible to use these vehicles; which is why we have explored the possibility of resorting to the Google Earth three-dimensional visualization system. In this case, by superimposing on the historical photograph, the aim is to obtain the current image with the same point of view, with which to generate animations (Figure 5).

In the case of oblique aerial photography and terrestrial photography, the level of precision in the overlay is lower. This is because the adjustment process has to be done manually, looking for the same framing and point of view to obtain a current replica of the historical photograph. Once we have two or more photographs with the same framing, by adapting a Javascript⁴, it is possible to superimpose and integrate the images in a comparator. For repeated photography, regarding the technical part, it does not differ, in essence, from that already mentioned for the elaboration of comparators with vertical or oblique aerial photography (Figure 6).

Another technique implemented has been the construction of block diagrams, since it interests to provide interactivity when manipulating three-dimensional models. GIS software has incorporated tools for the analysis and visualization of these models in 2.5 D or 3D. Thus, QuantumGis allows these models to be viewed and exported for publication on the web, thanks to a specific plug-in that converts the model into a web page, compatible with any browser that supports WebGL, using a Javascript library called Three.js. Additionally, it is possible to export in GLTF format which constitutes a 3D element. This model can also be exported and uploaded to the sketchfab platform, where it is possible to configure its display, incorporate views, images, explanations and audios. It is also compatible with Virtual Reality vision glasses.

Besides, the Structure from Motion (SfM) algorithms that are used for the elaboration of historical orthophotomaps have other applications, among which is the elaboration of three-dimensional photogrammetric models obtained from ground photography and/or aerial photography taken from unmanned vehicles. In this case, it is necessary to carry out a total photographic coating of the study area, and with a high percentage of overlap between consecutive photographs. It will be precisely such overlapping of the photographs that will allow the software to calculate the position of the camera and its orientation, as well as the geometry and 3D structure of the object⁵. The final result is a three-dimensional photogrammetric model with photographic texture, which can be shared through online platforms such as sketchfab or directly in specific Virtual Reality or Augmented Reality software (Figure 7).

Another form of representation has to do with the capacity of 360° cameras to achieve a sensation of immersion, that is to say, to generate the feeling of being inside the photograph. In virtual tours we are not limited to a single point of view or framing but to a spherical view where incorporating a wide range of explanatory elements is possible. To develop virtual tours based on 360° spherical photos or 360° panoramas, free software available on the Internet can be used, such as Kuula, which is easy to use; or professional software (we use 3D-Vista), which offer much more possibilities (Figure 11), but whose handling, on the other hand, requires a specific learning process.

3. Results. Landscape analysis with Augmented Reality Tools

Regarding the activation of the tools, access to Augmented Reality in this paper can be done in different ways: in the case of desktops and laptops, by using the web link at the bottom of the figure; and for mobile devices (tablets and smartphones), by using the icon , downloading the Observatorio del Territorio app (<https://observatoriodelterritorio.onirix.com/daabb928ea9b4c519285e9f5ffb4966a>), enabling “unknown sources” and

4 JuxtaposeJS or TwentyTwenty are examples of these java libraries that allow to program these comparators. It can even be done automatically in <https://juxtapose.knightlab.com/>

5 The use of targets to align the photographs is also of great help. At the same time, they will serve as control points to scale and geolocate the model.

selecting “LandscapeGraphics” (once the app has started, it is necessary to scan the figure with the marker so that Augmented Reality is activated). Or by using the icon , downloading the Gijón Aumentado app in Google Play and scanning the corresponding figure. But it should be marked that tools in this research could be integrated in various ways to deploy an Augmented Reality experience. the same element can be used with different levels: QR codes activatable on site, real objects as markers, or geopositioning.

Using historical photography collections, we have firstly developed a simple Augmented Reality tool aimed at allowing the user to see the transformations suffered by a landscape; all this through the comparison between aerial photographs taken on two different dates. By dividing the screen into two halves and having buttons referring to the dates in each of them, it allows the user to choose the corresponding image to make the comparison. In this way, the transformations that occurred in a previously defined time interval can be observed. Comparison is facilitated by a sliding touch curtain (Figure 3).

Figure 3. Examples of aerial photography comparators. Above, Avilés (1956-2011); down, Gijón (1945, 1956, 1970, 1984, 1994, 2003 and 2011)



Own elaboration. Available at: Observatorio del Territorio (Avilés) and Gijón Aumentado.

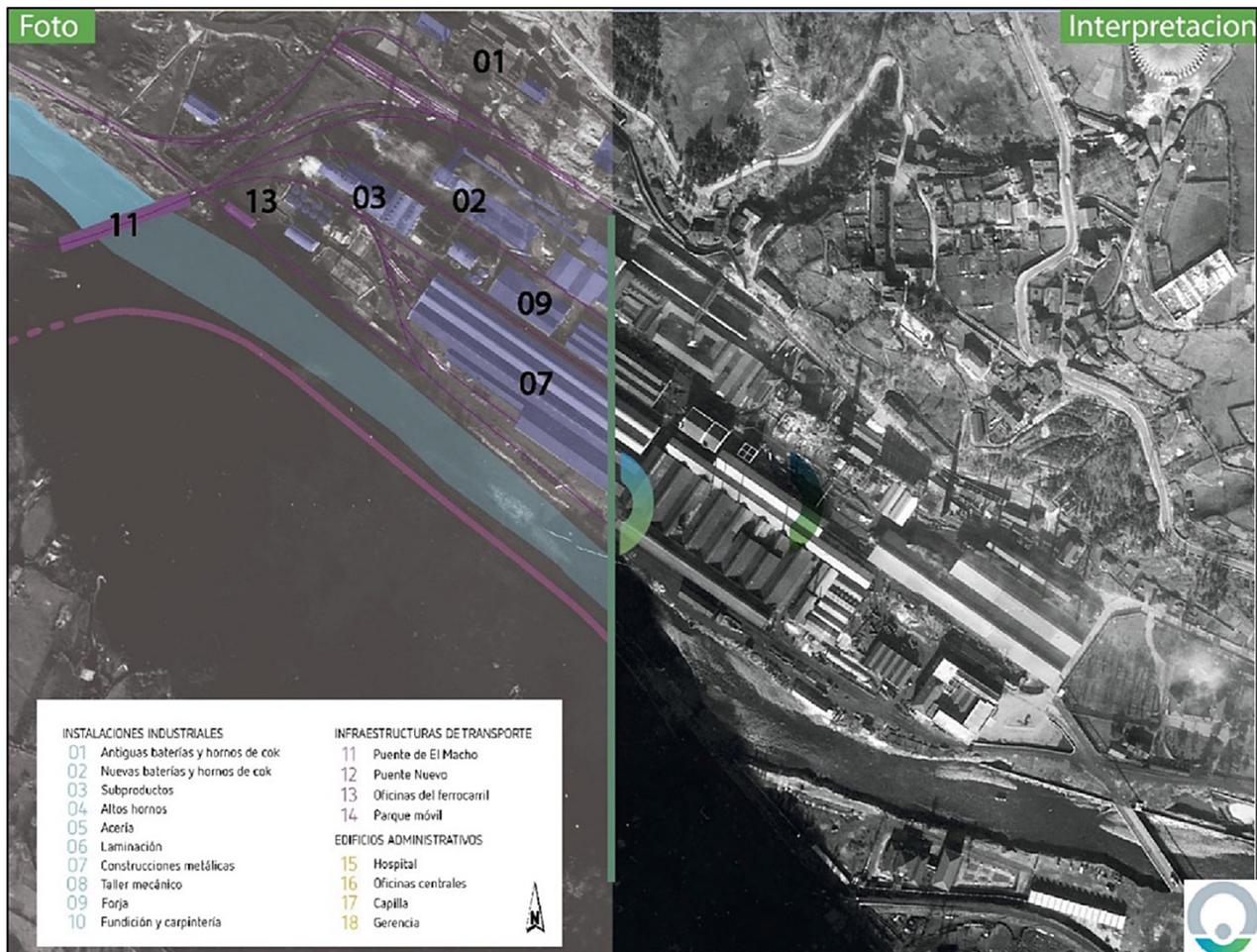
Una guía del Gijón histórico basada en técnicas de Realidad Aumentada <http://www.observatoriodeltorrito.es/expo/urbe3/aviles.html>

A variant of this would be oriented to the exploitation of oblique, both historical and current aerial photography, on which to carry out works of location, identification and analysis of the structural elements of landscape.

The results that can be obtained are more satisfactory when vertical aerial photography is used to document the landscape transformations that took place throughout the 20th century, especially those that occurred in the second half, or during the last two decades. On the other hand, oblique images can be used in landscape studies, both in the timeless aspect and in the analysis of their dynamics; but the best results are achieved when they are used simultaneously and in addition to vertical aerial photographs and cartography. In fact, oblique aerial photography offers us a view of the surface elements that is more familiar to us and, consequently, interpretation tasks are substantially facilitated. However, despite the general overview that they provide, it is still true that interpretation is sometimes limited by the perspective of oblique vision; then the complementary use of oblique photographs with verticals and maps promotes a better understanding of landscape organization.

As it has been exposed, this way of combining graphic materials to compose dynamic images allows an interesting reading of inherited landscapes. This will be more fruitful the greater the knowledge of the historical processes that shaped landscapes (Figure 4). The repertoire of phenomena that can be studied using aerial photography is considerable, by analysing the morphology, structure and use of different elements that make up the landscape. The logic of some of these elements can be found in past historical contexts and they have endured, fossilized in the landscape, even changing their use but keeping its shape. It is possible to link some with the Roman era (parcels, roads, mining, etc.), to the medieval period (abandoned urban settlements, roads, cattle ravines, hydraulic works, parcels ...), to the modern age (canals and irrigation works, dams, breakages, maritime ports ...) or to the 19th and first half of the 20th centuries (hydraulic works, ports, airfields and airports, railways and roads, mining, industrialization, etc.).

Figure 4. Photointerpretation work using a comparator (slide). In the image, the missing nineteenth-century steel factory Fábrica de Mieres, located on the right bank of the Caudal River



Source: Asturias Railway Museum (the image) and own elaboration (photointerpretation) <http://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/foto/fabrica.html>

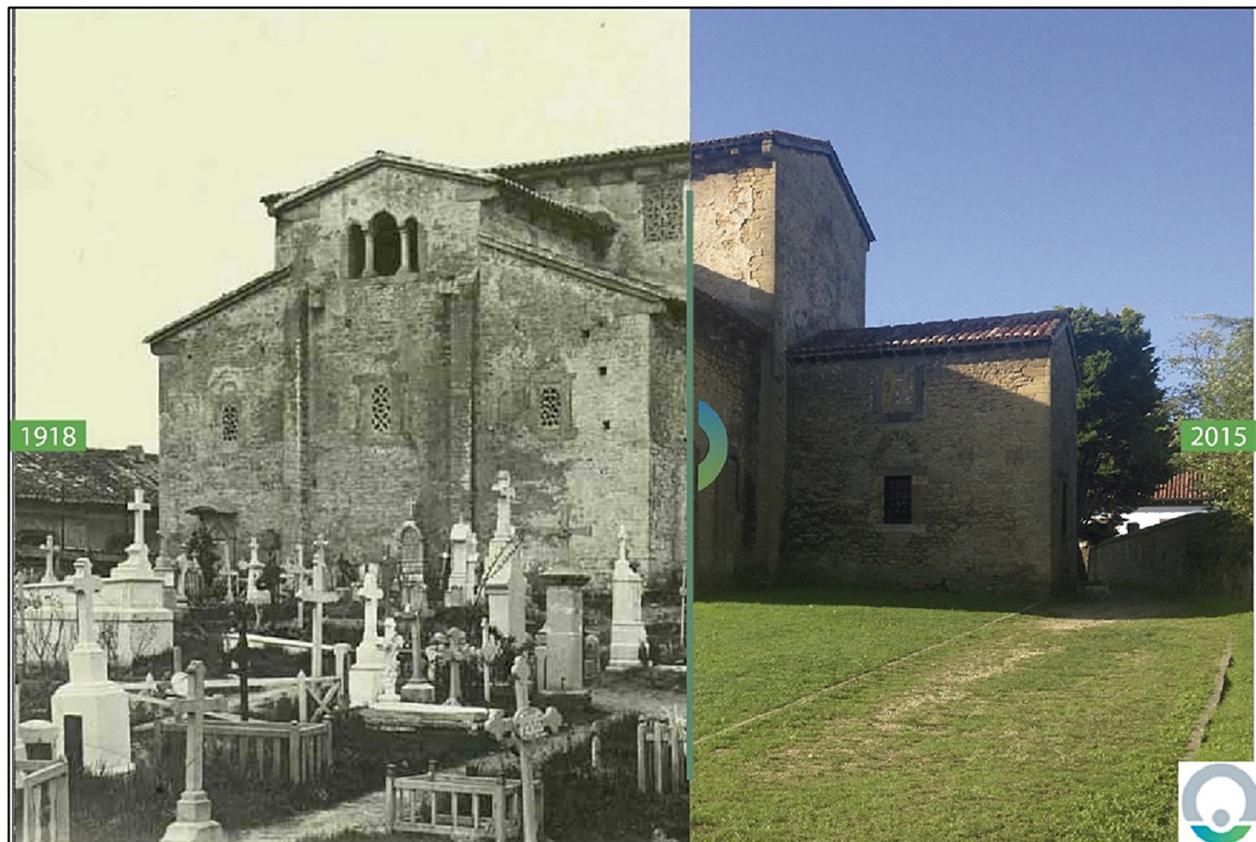
Figure 5. Avilés, sequence of oblique aerial images



Own elaboration. Available at: Observatorio del Territorio <http://www.observatoriodelterritorio.es/expo/urbe3/img/intro.gif>

Repeated photography can also help to understand landscape transformations when they are not perceptible in other graphic representations, such as cartographic ones (Figure 6). Following the methodological proposal by Carré and Metailié (2008) and experiences accumulated so far⁶, our tool tries to systematize the process of making the repeated photograph, basing it on the location of the historical images that can be used and, secondly, on exposing the current image from the same, or similar, point of view and angle.

Figure 6. Terrestrial photograph comparator by using slide: Santullano Pre-Romanesque Church, Oviedo (1918, 2018)



Own elaboration. Available at: Observatorio del Territorio <http://www.observatoriodelterritorio.es/expo/urbe2/Prerromano/SanJulian2.html>

Among the tools designed, there are also three-dimensional blocks (Figure 7), which have a long tradition in geographic analysis, particularly in the field of physical geography. They also offer new possibilities for the study of landscapes in their digital and interactive aspects, and constitute an Augmented Reality resource with singular utility when rotating is possible to recognize forms and structures from different angles (Carbonell Carrera & Bermejo Asensio, 2017a; Priestnall, 2009).

⁶ Notable in this regard are the French experiences of L'Observatoire Photographique du Paysage, the Parc National des Pyrénées, or L'Observatoire Homme-Milieu Pyrénées Haut Vicdessos; as well as the work carried out by the Andalusian Landscapes Observatory and Archive (OAPA) (González Díaz, 2019).

Figure 8. Didactic brochure with Gijón urban history⁷

Own elaboration. Available at: Observatorio del Territorio (Fernández García et al., 2018). Download the PDF brochure <http://www.observatoriodelterritorio.es/wp-content/uploads/2018/06/GijonAumentado.pdf> or the mobile app <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.fundacionctic.GijonAumentado>

Figure 9. Example of the use of image markers in the educational brochure that collects the urban history of Gijón

VENTURA ÁLVAREZ SALA. EN LA PLAZA DE GIJÓN. En "Paseos y Bañeríos en el arco Atlántico. Paisaje del ocio burgués en 1850 y 1900" Ayuntamiento de Gijón 2016. BAÑERÍOS GIJÓN 1928. En Asturias en fotos antiguas.

GIJÓN BURGUES. 11 - SOCIEDAD BURGUESA

El siglo XIX se caracterizó por un significativo proceso de cambios, tanto en el aspecto económico como en el social, que trajo aparejado el ascenso de una nueva clase social, la burguesía. Con ella, poco a poco, se fue rompiendo con los modelos del Antiguo Régimen y se fueron imponiendo nuevos prototipos sociales y económicos que determinarían el devenir del paisaje urbano gijonés.

La burguesía, que basó su poder económico en la acumulación de capital proveniente fundamentalmente de las actividades comerciales e industriales, comenzó a demandar nuevos modelos y espacios de ocio, lo que se acabaría plasmando en el espacio urbano en forma de paseos, cines y teatros, o baños de ola y balnearios. Del mismo modo, el ascenso de la burguesía se vio acompañado de la aparición de nuevos modelos constructivos, tanto en el ámbito residencial como el comercial.

Una de las señas de identidad de este periodo fueron las reformas interiores que llevaron a cabo en las ciudades con la finalidad de adecuarlas a los nuevos modelos y necesidades urbanas, buscando el embellecimiento y la creación de espacios amplios y cómodos siguiendo el modelo de Haussmann en París. Así ocurrió en Gijón con la apertura de la Plaza del Carmen o de las calles Álvarez Garaya e Instituto.

Los ayuntamientos de las principales villas y ciudades asturianas se habían situado desde los siglos XVI y XVII en los espacios inmediatos a las murallas, en las inmediaciones de las puertas, tal y como se hacía con las plazas de los mercados. Estos espacios fueron cobrando importancia y centralidad con el paso de los años, apareciendo en el siglo XIX nuevas plazas porticadas y rectangulares, entre ellas la Plaza Mayor de Gijón que albergó la nueva Casa Consistorial.

Fuente: FERNÁNDEZ CUESTA, G. (Ed.): *VIRBE II. La construcción histórica de la ciudad de Gijón*

Artículo Teatro Jovellanos (donde la biblioteca pública).

Own elaboration. Available at: Observatorio del Territorio <http://www.observatoriodelterritorio.es/wp-content/uploads/2018/06/GijonAumentado.pdf>

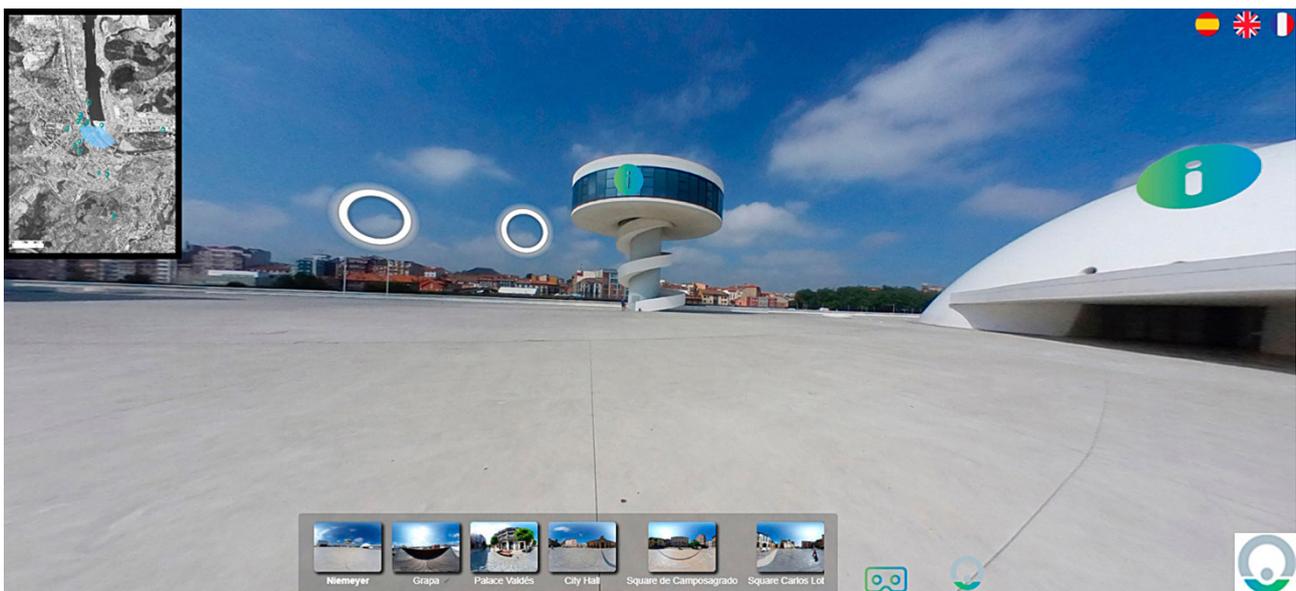
⁷ The Gijón Augmentado proposal arises from an agreement with the city council and Fundación CTIC for the preparation of a mobile application (Android system) and a guide brochure. These were conceived for the dissemination of knowledge of the Gijón urban landscape with a tourist and educational purpose, through the multimedia explanation of its fundamental pieces, including heritage assets. The user only needs a copy of the guide booklet and download the app from the operating system's virtual store to start the interactive experience. The emerging and dynamic graphic resources that house the "augmented" textual and graphic information (animations, sliders, 3D blocks, etc.) are displayed when the camera is focused on the brochure images, once the mobile application is opened. It also contains a virtual tour composed of a combination of spherical photographs which are nourished by additional materials (historical photographs, documents, audios...).

Figure 10. Didactic-tourist map showing a tour in Gijón's historic centre



Own elaboration. Available at: Observatorio del Territorio. Download the PDF plan http://www.observatoriodelterritorio.es/wp-content/uploads/2020/04/Planolitinerio_Gijon_r.pdf or the mobile app <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.fundacionctic.GijonAumentado>

Figure 11. Avilés virtual tour generated by using 3dVista



Own elaboration. Available at: Observatorio del territorio <http://www.observatoriodelterritorio.es/rarv/aviles/>

Finally, virtual itineraries made up of 360° spherical photos or 360° panoramas (both indoor and outdoor spaces) are based on the relationship between Points of Interest (POI), as landmarks in scenic viewpoints (Figure 11). In each POI, all relevant “augmented” information is linked.

4. Discussion

Learning to observe and interpret landscapes is relevant since the territory, and the values it treasures, constitute an essential area for the construction of a solid citizenship, in relation to cultural learning and awareness with the environment; and this, taking the analysis and valuation of landscape to meet the foundations of a renewed management of territorial heritage (Gómez, 2013; Martínez de Pisón, 2010). In this sense, it is relevant not only institutional expert-based approaches but also local (place-based), participatory and inclusive ones (Dakin, 2003; Marques et al., 2019).

The interest in landscapes from various areas of society as educational, research, cultural, social, even health (McIntosh et al., 2019) stands as one of the main objectives to be achieved, in such a way that it contributes to its maintenance and conservation, as well as to the increase of social awareness towards heritage. Thus, the efforts in this research have been directed towards the development of tools that stimulate the approach, knowledge and enjoyment of landscape by a wider public in several activities (tourism, common leisure, environmental education, etc.); but also, for those who may be interested in the study and analysis of its dynamics in higher education, research or spatial planning.

As noted above, in a society where the visual component is becoming increasingly important, in which new technologies are spreading and the spatial dimension has come to occupy an essential place, technologies have great potential to facilitate the interpretation of landscape dynamics from an innovative perspective (Squire, 2010; Olay Varillas et al., 2019) different from traditional methods. In this context, the incorporation of Augmented Reality acquires interest as long as it represents a new step in the process of continuous adaptation between forms of representation / valuation and technical advances. It must be taken into account that in a situation of constant technological evolution, proposals for the transmission of knowledge have to adapt to the new needs and habits of society (Prensky, 2001; Ramón, 2017; Fernández García & Herrera Arenas, 2022).

Although there has been much debate about whether Geography is a visual discipline (Driver, 2003; Thornes, 2004; Lois, 2009) or not (Rose, 2003, 2016), the importance of the representation of landscapes as demonstrated in this work seems clear. Indeed, geographers have endeavoured to represent the territory and explain the landscape through various procedures that involve a process of synthesis or abstraction. Of these procedures, the difficulty of representing reality in a static and two-dimensional format must be appreciated, as well as the value of semiology for setting the bases for the legibility of graphic representations (with principles mainly established by Jacques Bertin at the end of the 60s of last century). In addition, we must consider the ability of geographical science to incorporate new techniques that have made it possible to fine-tune new representation variables adapted to new demands, from Humboldt's paintings of nature, to the early introduction of photography (Garrido et al., 2016), both terrestrial and aerial; or the irruption of Geographic Information Systems (Moya et al., 2012) without neglecting the semiological rigor. On this line, this work has intended to give way to more intuitive visualizations in which the new expectations of 21st century users are present, such as interaction, dynamic character, autoguiding and multitemporal representation. It is understandable that due to these new user demands, the role of virtual and augmented realities takes on special relevance (Çöltekin et al., 2020). Virtual and augmented realities technologies offer us the possibility of including new forms of representation which, in combination with the classic ones, can update the way of presenting and modelling geographic information about processes, forms, structures.... Thus, our research contributes to these tools being perceived as suitable for a new dynamic way of knowledge transmission and dissemination of scientific content.

Despite the fact that these techniques have not been sufficiently treated from academic Geography (Bos, 2021), Augmented Reality techniques, besides the Virtual Reality ones, allow the incorporation of 360° integrated views, three-dimensional and interactive elements (Bos et al., 2022; Carrera et al., 2018; Delgado Peña, 2017) which help a more complete understanding of landscapes and some of their most prominent components, as exposed in this research. Moreover, they facilitate new possibilities in the consideration of the temporal dimension, a key point to explain the dynamism of landscapes; and, finally, they allow the insertion of complementary information that has no place in the classic representations of landscapes. Hence the interest in conceiving formulas for the use of Augmented Reality to progress in a field of knowledge with high socio-cultural, economic and environmental interest. In this sense, the main challenge has been to achieve more or less complex combinations of texts and various graphic materials in figures with dynamic effects and emerging elements. Hence the need to delve deeper into the balance between communicative efficiency of geographical information and technological possibilities; and to make this line of studies evolve, continuous testing of existing and future computer programs is necessary. This suggestive tool can be especially suitable as long as it is correctly supported by the technological pillars (appropriate and accessible

technical solutions) and the contents (scientific quality, correct formats, adapted knowledge level) so that it is effective for users (Olay Varillas et al., 2019; Beato et al., 2020). In this vein, some academic and scientific works linked to our project or others have included RA and RV for landscape representation with the purpose that governs our research (Ghadirian & Bishop, 2008; Carbonell Carrera & Bermejo Asensio, 2017a; Martínez-Graña et al. 2017; Delgado Álvarez, 2022; Beato et al., 2020; Marino et al., 2021; Rodrigues et al., 2018; Stintzing et al., 2020).

5. Conclusions

The research has led to reflection on a set of tools composed and used in educational, tourist and research contexts and disseminated in scientific meetings or publications. The results of these works have encouraged us to consolidate some proposals with materials already used in geography, such as photography or digital models, but applying new representation techniques (until now these did not have a wide place in the classic publication media). These proposals offer new possibilities for the study of landscapes and for the dissemination of their characteristics. The gear of this triad, materials, techniques and applications, through current Augmented Reality technology opens a new path that allows new ways of approaching landscape knowledge by researchers and teaching staff (and also by other kind of public: technical staff in public entities, tourist agents...).

This sequence of materials-techniques-applications must be based on a rigorous geographical and landscape analysis and on careful exposition or didactic planning. Only in this way can appropriate and quality content be conceived. In any case, it is possible to conclude that approaching the study of landscape with the use of Augmented Reality techniques will mean an improvement in the understanding of the evolution and configuration processes of landscapes due, among other things, to the possibilities of interaction and dynamism.

Undoubtedly, the visual and graphic component have always played a very important role in geography, opening in recent years a certain debate about the weight that this component should have. The results of this research show that the graphic treatment of information, as a source of analysis, or as a result of research, has had, and should continue to have, a really important weight in geographical science. In this sense, Augmented Reality can offer the possibility of incorporating new formats and applications to research. And it can become a powerful tool for the transmission of knowledge. To do this, it is necessary to develop and adapt geographic content to materials suitable for new modes of communication.

Finally, the use of the Augmented Reality techniques does not imply a physical distancing from the study object. On the contrary, direct contact with study areas and with landscapes, through field trips and excursions, may preserve a fundamental weight. Augmented Reality, far from replacing them, can be an enriching complement, capable of providing new content that is superimposed on reality, thus contributing to ubiquitous interpretation and learning. To achieve these advantages, it is necessary to focus the effort on the prior step of treating graphic materials and designing tools that will contribute to enrich experiences. It is about elements that can be activated *in situ* in a way that another type of media cannot make; what allows a greater degree of self-guide.

The development of more advanced and complex graphic resources combining a greater variety of audiovisual and textual materials is a challenge to take into account in the future development of this research axe. Furthermore, given the vigor with which geographic information technologies are evolving, other challenges may be directed towards the generation of fully virtual itineraries for a greater expansion of non-face-to-face landscape experiences. Indeed, for situations where traveling and observation *in situ* are not possible, we pose the challenge of taking Virtual Reality techniques in the immediate future studies, following Griffon et al. (2011), Kitchen (2020) or Stojšić et al. (2016). These Virtual Reality techniques hold the advantage of integrating three-dimensional and interactive elements in an immersive way and without direct contact with the represented territory, which also satisfy a wide range of utilities and situations.

Funding

This work was supported by Spanish *Ministerio de Economía y Competitividad* under Grant CSO2017-84623-R. It is part of the results from the research project *La Realidad Aumentada como herramienta para la explicación del paisaje. Aplicaciones a la docencia y al turismo*.

References

- Akçayır, M. & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>
- Alomar-Garau, G. & Gómez-Zotano, J. (2022). Del paisaje en la geografía: Perspectivas y actividades del Grupo de Paisaje de la Asociación Española de Geografía. *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València*, (108-9), 857-874. <https://doi.org/10.7203/CGUV.108-9.24067>
- Arnheim, R. (1997). *Visual thinking*. Univ. of California Press.
- Beato, S., Poblete, M. A., Mariano, J. L., Herrera, D., & Fernández, F. (2020). Carreteras paisajísticas y realidad aumentada en la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano). *Ería*, 40(2), 145-166. <https://doi.org/10.17811/er.2.2020.145-166>.
- Bos, D. (2021). Geography and virtual reality. *Geography Compass*, 15(9), e12590. <https://doi.org/10.1111/gec3.12590>
- Bos, D., Miller, S., & Bull, E. (2022). Using virtual reality (VR) for teaching and learning in geography: fieldwork, analytical skills, and employability. *Journal of Geography in Higher Education*, 46(3), 479-488. <https://doi.org/10.1080/03098265.2021.1901867>
- Busquets, J. (2010). La educación en paisaje: una oportunidad para la escuela. *Íber. Didáctica de las Ciencias Sociales, Geografía e Historia*, 65, 7-16.
- Carbonell Carrera, C. & Bermejo Asensio, L. A. (2017a). Landscape interpretation with augmented reality and maps to improve spatial orientation skill. *Journal of Geography in Higher Education*, 41(1), 119-133. <https://doi.org/10.1080/03098265.2016.1260530>
- Carbonell Carrera, C. & Bermejo Asensio, L. A. (2017b). Augmented reality as a digital teaching environment to develop spatial thinking. *Cartography and Geographic Information Science*, 44(3), 259-270. <https://doi.org/10.1080/15230406.2016.1145556>
- Carré, J. & Metallié, J.-P. (2008). De los paisajes de ayer a los paisajes de mañana. Metodología de un observatorio fotográfico para el análisis de las dinámicas paisajísticas: El valle de Vicdessos, Pirineos de Ariège (Francia). *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 43(2), 123-150.
- Carrera, C. C., Perez, J. L. S., & Cantero, J. de la T. (2018). Teaching with AR as a tool for relief visualization: Usability and motivation study. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 27(1), 69-84. <https://doi.org/10.1080/10382046.2017.1285135>
- Chang, G., Morreale, P., & Medicherla, P. (2010). Applications of Augmented Reality Systems in Education. In D. Gibson & B. Dodge (Eds.), *Proceedings of Society for Information Technology & Teacher Education International Conference 2010* (pp. 1380-1385). Association for the Advancement of Computing in Education (AACE).
- Cheng, K.-H. & Tsai, C.-C. (2013). Affordances of Augmented Reality in Science Learning: Suggestions for Future Research. *Journal of Science Education and Technology*, 22(4), 449-462. <https://doi.org/10.1007/s10956-012-9405-9>
- Chiang, T. H. C., Yang, S. J. H., & Hwang, G.-J. (2014). An Augmented Reality-based Mobile Learning System to Improve Students' Learning Achievements and Motivations in Natural Science Inquiry Activities. *Journal of Educational Technology & Society*, 17(4), 352-365.
- Çöltekin, A., Lochhead, I., Madden, M., Christophe, S., Devaux, A., Pettit, C., Lock, O., Shukla, S., Herman, L., Stachoň, Z., Kubíček, P., Snopková, D., Bernardes, S., & Hedley, N. (2020). Extended Reality in Spatial Sciences: A Review of Research Challenges and Future Directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 439. <https://doi.org/10.3390/ijgi9070439>
- Cobo Romani, C., & Moravec, J. W. (2011). *Aprendizaje invisible hacia una nueva ecología de la educación*. Universitat de Barcelona.

- Dakin, S. (2003). There's more to landscape than meets the eye: Towards inclusive landscape assessment in resource and environmental management. *The Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, 47, 185-200. <https://doi.org/10.1111/1541-0064.t01-1-00003>
- Damala, A., Cubaud, P., Bationo, A., Houlier, P., & Marchal, I. (2008). Bridging the gap between the digital and the physical: Design and evaluation of a mobile augmented reality guide for the museum visit. In *DIMEA'08 Proceedings of 3rd International Conference on Digital Interactive Media in Entertainment and Arts* (pp. 120-127). <https://doi.org/10.1145/1413634.1413660>
- Delgado Álvarez, R. (2022). Realidad aumentada y contenidos geográficos en los itinerarios didácticos. Propuesta didáctica para su puesta en valor en la formación de docentes de Educación Primaria: el paisaje de Las Villuercas. *Ería*, 42(2), 191-207. <https://doi.org/10.17811/er.42.2022.191-207>
- Delgado Peña, J.J. (2017). Enseñanza virtual y actividades digitales para la adquisición de competencias geoespaciales. In *Actas VIII Congreso Ibérico de Didáctica de Geografía* (pp. 12-24).
- Dodge, M., McDerby, M., & Turner, M. (Ed.). (2008). *Geographic Visualization*. <https://doi.org/10.1002/9780470987643>
- Driver, F. (2003). On Geography as a Visual Discipline. *Antipode*, 35(2), 227-231. <https://doi.org/10.1111/1467-8330.00319>
- Eve, S. (2012). Augmenting phenomenology: Using augmented reality to aid archaeological phenomenology in the landscape. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 19, 582-600. <https://doi.org/10.1007/S10816-012-9142-7>
- Falk, G. & Chatel, A. (2017). Smartgeo - mobile learning in geography education. *European Journal of Geography*, 8, 153-165.
- Fernández García, F. (1998). Las primeras aplicaciones civiles de la fotografía aérea en España. 1: El Catastro y las Confederaciones Hidrográficas. *Ería*, 46, 117-130. <https://doi.org/10.17811/er.0.1998.117-130>
- Fernández García, F. & Quirós Linares (1997). El vuelo fotográfico de la «Serie A». *Ería*, 43, 190-198. <https://doi.org/10.17811/er.0.1997.190-198>
- Fernández García, F., Herrera Arenas, D., Olay Varillas, D., & Fernández Bustamante, C. (2018). *Gijón aumentado. Una guía del Gijón histórico basada en técnicas de realidad aumentada*. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, CTIC, Universidad de Oviedo. <https://www.observatoriodelterritorio.es/wp-content/uploads/2018/06/GijonAumentado.pdf>
- Fernández García, F. & Herrera Arenas, D. (2022). Territorio, paisaje, turismo y TIC. La realidad aumentada y la realidad virtual como herramientas para la promoción del turismo. *Estudios Turísticos* (224), 43-57. <https://doi.org/10.61520/et.2242022.13>
- García, A. (2011). El paisaje: un desafío curricular y didáctico. *Didácticas Específicas*, 14, 1-19.
- Garrido, E., Rebok, S., & Puig-Samper, M. Á. (2016). El arte al servicio de la ciencia: Antecedentes artísticos para la impresión total del paisaje en Alexander von Humboldt. *Dynamis*, 36(2), 363-390.
- Ghadirian, P. & Bishop, I. (2008). Integration of Augmented Reality and GIS: A New Approach to Realistic Landscape Visualisation. *Landscape and Urban Planning*, 86(3), 226-232. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.03.004>
- Gómez, J. (2013). Del patrimonio paisaje a los paisajes patrimonio. *Documents d' Anàlisi Geogràfica*, 59/1, 5-20. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.48>
- González Díaz, J.A. (2019). *Modelos de gestión del territorio, paisaje y biodiversidad en un espacio de montaña: la Reserva de la Biosfera de Redes* [Doctoral thesis, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/52834>
- Griffon, S., Nespoulous, A., Cheylan, J. P., Marty, P., & Auclair, D. (2011). Virtual reality for cultural landscape visualization. *Virtual Reality*, 15(4), 279-294. <https://doi.org/10.1007/s10055-010-0160-z>
- Hernández, A.M. (2010). El valor del paisaje cultural como estrategia didáctica. *Tejuelo*, 9, 162-178.
- Hollman, V. (2008). Geografía y cultura visual: Apuntes para la discusión de una agenda de indagación. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía*, (7), 120-135.

- Hollman, V. C. (2016). Ante las imágenes: Los desafíos del giro visual para la Geografía. *GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)*, 20(3), 518. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2016.121485>
- Kraak, M. (2020). Geovisualization. In A. Kobayashi (Ed.), *International Encyclopedia of Human Geography (Second Edition)* (pp. 141-51). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102295-5.10552-9>
- Kipper, G. & Rampolla, J. (2013). *Augmented reality: An emerging technologies guide to AR*. Syngress/Elsevier.
- Kitchen, R. (2020). Using mobile virtual reality to enhance fieldwork experiences in school geography. *Geography Education in the Digital World: Linking Theory and Practice*, chapter 12. <https://doi.org/10.4324/9780429274909-12>
- Lens-Fitzgerald, M. (2009). *Sprxmobile, Augmented Reality Hype Cycle*.
- Liceras, A. (2013). Didáctica del paisaje. Lo que es, lo que representa, cómo se vive. *Íber. Didáctica de las Ciencias Sociales, Geografía e Historia*, 74, 85-93.
- Lois, C. M. (2009). Imagen cartográfica e imaginarios geográficos. Los lugares y las formas de los mapas en nuestra cultura visual. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 13(0).
- Martínez-Graña, A. M., Legoinha, P., González-Delgado, J. A., Dabrio, C. J., Pais, J., Goy, J. L., Zazo, C., Civis, J., Armenteros, I., Alonso-Gavilan, G., Dias, R., & Cunha, T. (2017). Augmented Reality in a Hiking Tour of the Miocene Geoheritage of the Central Algarve Cliffs (Portugal). *Geoheritage*, 9(1), 121-131. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0182-3>
- Martínez de Pisón, E. (2010). Saber ver el paisaje. *Estudios Geográficos*, 269, 395-414. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201013>
- Marino, J.L., Poblete, M.Á., Beato, S., & Herrera, D. (2021). Geotourism Itineraries and Augmented Reality in the Geomorphosites of the Arribes del Duero Natural Park (Zamora Sector, Spain). *Geoheritage*, 13, 16 <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00539-x>
- Marques, B., McIntosh, J., & Carson, H. (2019). Whispering tales: using augmented reality to enhance cultural landscapes and indigenous values. *AlterNative: An International Journal of Indigenous Peoples*, 15(3), 193-204. <https://doi.org/10.1177/1177180119860266>
- McIntosh, J., Rodgers, M., Marques, B., & Gibbard, A. (2019). The use of VR for creating therapeutic environments for the health and wellbeing of military personnel, their families and their communities. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 4, 185-194. <https://doi.org/10.14627/537663020>
- Mirzoeff, N. & García Segura, P. (2003). *Una introducción a la cultura visual*. Paidós.
- Moya Honduvilla, J., Bernabe Poveda, M. A., & Escobar, F. J. (2012). La representación de la información geográfica. In M. Á. Bernabé Poveda & C. M. López Vázquez (Eds.), *Fundamentos de las Infraestructuras de Datos Espaciales* (pp. 109-121).
- Olay Varillas, D., Herrera Arenas, D. H., & Fernández García, F. (2019). La Realidad Aumentada como instrumento para el estudio de la dinámica del paisaje mediante el empleo de fotografía. *ArtyHum Revista Digital de Artes y Humanidades, Monográfico: Desafíos epistemológicos, técnicos y educativos para las Humanidades Digitales*, (1), 11-29.
- Olcina Cantos, J., González Pérez, J. M., & López Estébanez, N. (2022). Un panorama general de la evolución de la geografía española (1992-2022). In *La geografía española actual. Estado de la cuestión: Aportación española al congreso de la UGI. París 2022. El tiempo de los geógrafos* (ANTE y USC, pp. 9-27). Asociación Española de Geografía.
- Ortag, F. (2012). Geovisualization and visual analytics. *International Cartographic Association*. <https://icaci.org/research-agenda/geovisualization-and-visual-analytics/>
- Ortega y Gasset, J. (1906, september 17th). La pedagogía del paisaje. *El Imparcial*.
- Peddie, J. (2017). *Augmented reality: Where we will all live*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54502-8>
- Pratama, H., Azman, M. N. A., Kenzhaliyev, O. B., Wijaya, H., & Kassymova, G.K. (2021). Application of augmented reality technology as an interactive learning medium in geography subjects. *Series of geology and technical sciences*, 4, 21-29. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.77>

- Prensky, M. (2001). Digital Natives, Digital Immigrants. *On the Horizon*, 9(5), 1-20. <https://doi.org/10.1108/10748120110424816>
- Priestnall, G. (2009). Landscape Visualization in Fieldwork. *Journal of Geography in Higher Education*, 33(sup1), S104-S112. <https://doi.org/10.1080/03098260903034020>
- Prisille, C. & Ellerbrake, M. (2020). Virtual Reality (VR) and Geography Education: Potentials of 360° 'Experiences' in Secondary Schools. In D. Edler, C. Jenal & O. Kühne. (Eds.), *Modern Approaches to the Visualization of Landscapes, RaumFragen: Stadt – Region – Landschaft* (pp. 321-332). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-30956-5_18
- Ramón, A. (2017). Tecnologías de la Información Geográfica, un recurso para el aprendizaje de la vida cotidiana. In R. Sebastià & E. M. Tonda (Eds.), *Enseñanza y aprendizaje de la Geografía para el siglo XXI* (pp. 151-173). Universidad de Alicante.
- Rodrigues, J. M. F., Ramos, C. M. Q., Cardoso, P. J. S., & Henriques, C. (eds.) (2018). *Handbook of Research on Technological Developments for Cultural Heritage and eTourism Applications*. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2927-9>
- Rogers, G.F. & Malde, H.E. (1984). *Bibliography of Repeat Photography for Evaluating Landscape Change*. University of Utah Press.
- Rose, G. (2003). On the Need to Ask How, Exactly, Is Geography «Visual»? *Antipode*, 35(2), 212-221. <https://doi.org/10.1111/1467-8330.00317>
- Rose, G. (2016). *Visual methodologies: An introduction to researching with visual materials*. SAGE Publications Ltd.
- Sánchez Verdú, R. & Sebastián-Alcaraz, R. (2014). *Realidad aumentada. Recurso para el aprendizaje de la geografía: Geoalcoi*. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/46773>
- Squire, K. (2010). From information to experience: Place-based augmented reality games as a model for learning in a globally networked society. *Teachers College Record*, 112, 2565-2602. <https://doi.org/10.1177/016146811011201001>
- Stintzing, M., Pietsch, S., & Wardenga, U. (2020). How to Teach “Landscape” Through Games?. In D. Edler, C. Jenal, y O. Kühne (Eds.), *Modern Approaches to the Visualization of Landscapes, RaumFragen: Stadt – Region – Landschaft* (pp. 333-349). Springer Fachmedien. https://doi.org/10.1007/978-3-658-30956-5_19
- Stojšić, I., Džigurski, A. I., Maričić, O., Bibić, L. I., & Vučković, S. Đ. (2016). Possible application of virtual reality in geography teaching. *Journal of Subject Didactics*, 1(2), 83-96.
- Thornes, J. E. (2004). The Visual Turn and Geography (Response to Rose 2003 Intervention). *Antipode*, 36(5), 787-794. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8330.2004.00452.x>

Disparidad entre cartografías oficiales de peligrosidad y eventos reales: análisis de posibles causas. Estudio de caso en el río Campanillas (Málaga)

Disparity between official hazard maps and real events: analysis of possible causes. Case study in the Campanillas river (Malaga-Spain)

AUTORÍA

Antonio Gallegos Reina 

Departamento de Geografía. Universidad de Málaga. Málaga, España.

José María Orellana

Macías 

Departamento de Geografía. Universidad de Málaga. Málaga, España.

María Jesús Perles

Roselló 

Departamento de Geografía. Universidad de Málaga. Málaga, España.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.24725>

CITACIÓN

Gallegos Reina, A., Orellana Macías, J. M., & Perles Roselló, M. J. (2024). Disparidad entre cartografías oficiales de peligrosidad y eventos reales: análisis de posibles causas. Estudio de caso en el río Campanillas (Málaga). *Investigaciones Geográficas*, (81), 51-70. <https://doi.org/10.14198/INGEO.24725>

CORRESPONDENCIA

Antonio Gallegos Reina (a.gallegos@uma.es)

HISTORIA

Recibido: 3 marzo 2023

Aceptado: 8 septiembre 2023

Publicado: 26 enero 2024

(Publicación anticipada: 23 de octubre 2023)

TÉRMINOS

© Antonio Gallegos Reina, José María Orellana Macías y María Jesús Perles Roselló

 Este trabajo se publica bajo una licencia [Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resumen

Una de las principales problemáticas en la delimitación de áreas inundables por parte de la administración procede del hecho de que los modelos hidrológico-hidráulicos y las cartografías preventivas oficiales derivadas de ellos no se ajustan bien a las láminas de inundación y peligrosidad reales, normalmente minusvalorándolas. Para confirmar esta hipótesis, el presente trabajo analiza unas recientes inundaciones producidas en el núcleo urbano de Campanillas (Málaga) mediante el análisis comparado del deslinde oficial de zonas inundables de la Junta de Andalucía y la cartografía unievento de dicho episodio de inundaciones. Los resultados corroboran la hipótesis de minusvaloración. Del análisis comparado, se extraen una serie de posibles causas. Algunas de ellas están relacionadas con el propio modelo hidrológico-hidráulico usado en la cartografía normativa (se ciñen a un ámbito territorial concreto y cerrado; no se tienen en consideración acciones antrópicas indirectas; no se consideran alteraciones del flujo de inundación por los circuitos artificiales de la trama urbana). Y otras están relacionadas con las particularidades de la peligrosidad de inundación en entornos mediterráneos (activación paralela y sinérgica de peligros asociados; no consideración de las condiciones resistásticas mediterráneas en la modelización de las obras de paso). Como aportación última se incluyen en el artículo una serie de acciones propositivas que pudieran mejorar la predicción de áreas inundables en la cartografía oficial.

Palabras clave: cartografías preventivas oficiales; inundabilidad; peligrosidad; entornos mediterráneos; Campanillas; modelo hidrológico-hidráulico.

Abstract

One of the main problems faced by authorities when delimiting flood areas is derived from the fact that hydraulic-hydrological models and their flood maps do not accurately correspond to the actual extent of the floods and hazards, often underestimating them. In order to assess this hypothesis, this paper analyses the recent flood in Campanillas (Málaga, Spain). The study compares the differences between the official flood maps and the real flood. The results of this study clearly confirm the aforementioned underestimation. Beyond a simple comparison, a series of potential causes of this underestimation are proposed. Some of them are related to the hydraulic-hydrological model used to create the official maps (e.g., it represents a closed area, it omits indirect anthropogenic activities, it omits flood flux alterations caused by roads, bridges, etc.). Additionally, other causes are related to the characteristics of the

flood hazard in Mediterranean areas (e.g., simultaneous and synergic associated hazards and the omission of rhexistasy in Mediterranean areas when modelling water infrastructures). To conclude, based on the causes of the highlighted inaccuracy of the official maps, several measures aimed at improving the forecasts in flood areas in these official maps are proposed.

Keywords: Official preventive maps; flood; hazard; Mediterranean areas; Campanillas; hydrological-hydraulic model.

1. Introducción

Actualmente en España el análisis de la peligrosidad por inundación se realiza exclusivamente mediante estudio hidrológico-hidráulico, que permite obtener láminas de inundación para distintos periodos de retorno. Y ello a pesar de que la Guía metodológica para la elaboración de mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones del Instituto Geológico y Minero Español (IGME) recomienda el uso integrado de métodos hidrológico-hidráulicos, geomorfológicos e históricos (Díez Herrero et al., 2008b). Las competencias al respecto están descentralizadas en las comunidades autónomas¹. En Andalucía, para las cuencas intracomunitarias, este proceso lo lleva a cabo la Dirección General de Planificación y Recursos Hídricos de la Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul de la Junta de Andalucía. Las láminas, una vez validadas por dicha consejería², pasan a formar parte de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM) y del Sistema Nacional de Cartografía de zonas Inundables (SNCZI). Esta información, ya oficial, es la que luego debe tenerse en consideración tanto para la ordenación territorial como para el planeamiento urbanístico, dando lugar a las distintas categorías de clasificación del suelo, así como condicionando el modo en que se puede desarrollar urbanísticamente dicho suelo.

El modo en que se realiza el análisis de la inundabilidad es homogéneo para todo el territorio español, si bien las características geomorfoclimáticas son muy dispares según la demarcación hidrográfica que se considere. Así, el litoral mediterráneo tiene unos condicionantes de peligrosidad y vulnerabilidad muy particulares, considerablemente superiores al de otras demarcaciones. Es por ello que aquí frecuentemente las estimaciones de mancha inundable minusvaloran el riesgo real, y superficies inundables calculadas para periodo de retorno de 500 años se alcanzan con periodos de retorno muy inferiores, dando lugar a inundaciones más extensas, con características y daños inesperados (Gallegos Reina & Perles Roselló, 2021).

El objetivo principal de este trabajo es el análisis de una cartografía normativa de peligrosidad de inundaciones en un entorno mediterráneo y su comparación con la lámina real de un evento equivalente, acaecido en enero de 2020, para poder estimar su grado de aproximación a la realidad y concluir posibles causas de desajuste para la potencial mejora de dicha cartografía.

Para poder cuantificar y caracterizar dichas diferencias se ha trabajado con un tramo fluvial en el entorno de la barriada de Campanillas (Málaga), de especial significado por su peligrosidad, su grado de urbanización y los planes de desarrollo urbanístico que el Ayuntamiento de Málaga proyecta para la zona. El área está catalogada como 'Área de Riesgo Potencial Significativo' por la Planificación de la gestión del riesgo de inundación en las Cuencas Intracomunitarias de Andalucía (Consejería de Sostenibilidad, 2020). También aparece en la categoría de máximo riesgo por el Plan de Prevención de Avenidas e Inundaciones en cauces Urbanos (Consejería de Obras Públicas y Transportes, 2012), y en la categoría de riesgo 'muy grave' por el Plan General de Ordenación Urbana del municipio de Málaga. Además, existe un episodio reciente de inundaciones que permite testear la realidad frente a las estimaciones derivadas de distintas modelizaciones.

Resumiendo lo anterior, este trabajo nace de la siguiente hipótesis de partida: los modelos convencionales de evaluación de la inundabilidad y las cartografías preventivas derivadas de ellos no se ajustan bien a las láminas de inundación y peligrosidad reales, normalmente minusvalorándolas. Para juzgar esta hipótesis, se ha usado la cartografía oficial de la Junta de Andalucía y la delineación unievento de un episodio de inundaciones reciente.

1.1. Antecedentes

La estimación de las zonas afectadas por la inundación a escala de cuenca para un determinado periodo de retorno se basa en la construcción, desarrollo e implementación de modelos de simulación. Para esta simulación, algunos autores han utilizado análisis de regresión múltiple (Jato-Espino et al., 2018), mientras que otros han optado por métodos alternativos como el análisis jerárquico de componentes (Stefanidis & Stathis, 2013),

¹ A excepción de las Demarcaciones Hidrográficas que ocupen más de una Comunidad Autónoma, en cuyo caso la competencia es del Estado, a través de las Confederaciones Hidrográficas. En los territorios insulares la competencia es de los cabildos, a través de sus consejos insulares.

² Estas láminas se enmarcan en los Planes de Gestión del Riesgo de Inundación. Posteriormente se remiten al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, que lo eleva al Gobierno y se aprueban mediante Real Decreto.

la combinación de modelos con imágenes de satélite (Afzal et al., 2022) o la utilización de redes neuronales artificiales (Chu et al., 2019). No obstante, los modelos numéricos hidrológicos-hidráulicos suelen ser los más habituales para la modelización de inundaciones (Patel et al., 2017; Costabile et al., 2020; Ongdas et al., 2020). Dentro de estos, los modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D) y los modelos acoplados de una dimensión (1D) son los más comunes, existiendo multitud de *softwares* disponibles, como HEC-RAS, TELEMAC2D, TUFLOW o MIKE FLOOD (Dyhouse et al., 2003; Boyte, 2014; Yu et al., 2015; Li et al., 2022; Namara et al., 2022).

En el caso de España, las inundaciones son el riesgo que mayores daños genera. Según datos del Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España, los datos se estiman en una media de 800 millones de euros anuales (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITERD], 2023). Las inundaciones afectan especialmente al litoral mediterráneo, especialmente en eventos con precipitaciones torrenciales de corta duración en el tiempo (unas horas), así como fuertes precipitaciones continuas durante varios días. En ambos escenarios, las precipitaciones provocan avenidas y crecidas súbitas en cauces que en muchas ocasiones están secos o tienen un caudal bajo durante una gran parte del año. Fruto de esta casuística, los estudios de inundabilidad, peligrosidad, y riesgo de inundación son frecuentes para cuencas del arco mediterráneo español, incluyendo el sur peninsular (Valle Martínez, 2017; Gallegos Reina, 2021), el sureste (Oliva & Olcina, 2023), y el levante (Segura-Beltrán, 2016; Hernández-Mora et al., 2021; Egibar et al., 2021). En estos estudios se observa cómo, en general, en estas zonas, la configuración del territorio y la ocupación de espacios de riesgo para actividades humanas hace que de forma recurrente se produzcan daños e impactos sobre bienes, propiedades y personas causados por el desbordamiento de ríos y ramblas.

En los estudios mencionados sobre inundabilidad, peligrosidad y riesgo de inundación, los autores utilizan diferentes metodologías para abordar el tema, que incluyen modelos de regresión, modelos hidrológicos, hidráulicos, etc. No obstante, autores como Wada et al. (2017) o Brunner et al. (2021) han destacado la dificultad para la correcta modelización de cauces y su llanura de inundación asociada, ya que existen multitud de parámetros que son sumamente complejos de parametrizar y de introducir en las modelizaciones. Entre estos parámetros se encuentran la disponibilidad de datos y su calidad (Slater & Villarini, 2017), los usos del suelo (Wada et al., 2017), la influencia de infraestructuras de regulación, retención o distribución (Verbunt et al., 2005; Wada et al., 2016), la estimación de la presencia de sólidos en el flujo de inundación (Cea et al., 2016), la concurrencia de otros procesos geomorfológicos asociados a la inundación, como movimientos del terreno, erosión hídrica, sedimentación, karstificación o expansividad de las arcillas (Gallegos Reina & Perles Roselló, 2020), o las condiciones de saturación hídrica del suelo y capacidad de absorción (Brunner et al., 2021).

Como resultado de estas dificultades, en muchas ocasiones existen grandes discrepancias entre las cartografías oficiales publicadas por los organismos competentes, los estudios y análisis realizados por especialistas, y la extensión de la lámina de inundación en eventos de precipitación (Camarasa Belmonte & Bescós, 2004). Esta falta de concordancia acaba por repercutir en la fiabilidad de las cartografías oficiales, en la percepción del riesgo por parte de la población, en la vulnerabilidad de la misma ante potenciales inundaciones, y en la planificación y gestión adecuados del riesgo de inundación. No en vano, la modelización hidrodinámica de una inundación debe servir en última instancia para la correcta gestión de la inundación en una situación de emergencia, por lo que los mapas existentes necesitan ser concienzudamente precisos en su representación del riesgo.

2. Metodología

Siguiendo el objetivo e hipótesis de partida descritos, la metodología utilizada en este artículo ha consistido en la realización de un análisis comparado de la peligrosidad expresada en distintas cartografías de inundabilidad. En una segunda fase se acomete el análisis de posibles causas de la disparidad entre ellas.

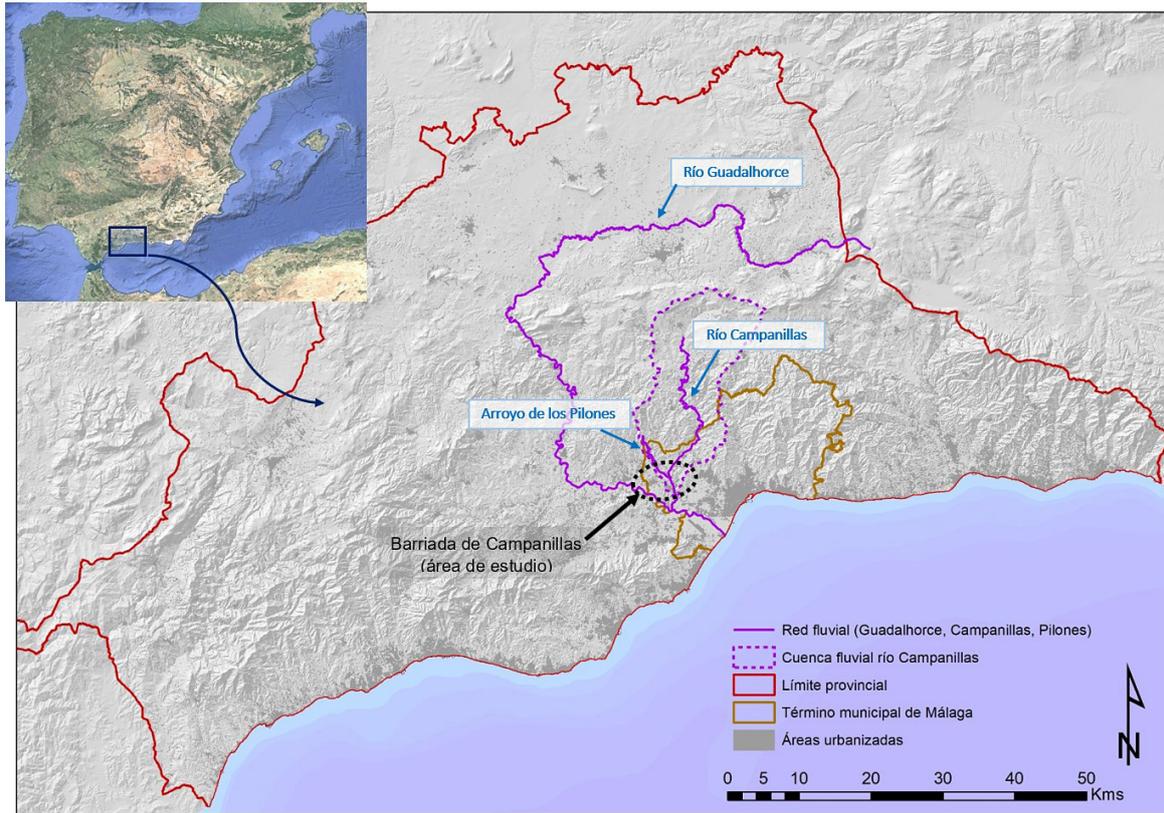
Para la realización del análisis comparado se han llevado a cabo las siguientes tareas:

1. Análisis geomorfológico e hidrológico del área de estudio, considerando para este último las precipitaciones acumuladas en las 24 horas previas al pico máximo de crecida del evento analizado.
2. Recopilación de la documentación cartográfica oficial de inundabilidad para la zona de estudio (ES060 ARPS 0049).
3. Elaboración de la cartografía real de área inundada para un evento de control (episodio de inundación que se produjo el día 25 de enero de 2020) mediante distintos métodos empíricos.

2.1. Área de estudio

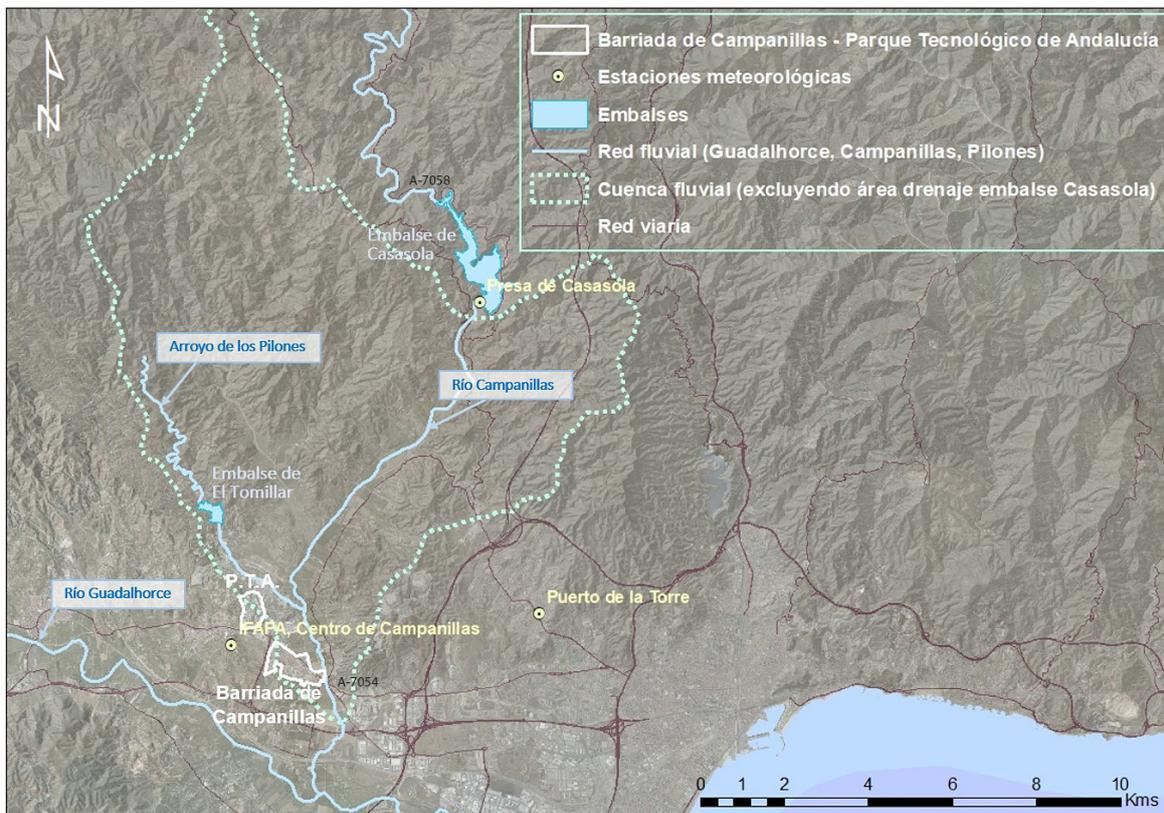
El área de estudio abarca la cuenca baja del río Campanillas, que discurre por el término municipal de Málaga (Figura 1). En concreto, el estudio se centra en el entorno del distrito de Campanillas, el cual es el principal foco de los problemas relacionados con las avenidas y las inundaciones causadas por el río hasta su desembocadura en el río Guadalhorce, unos 5 km aguas abajo (Figura 2).

Figura 1. Localización del área de estudio en la provincia de Málaga



Elaboración propia

Figura 2. Localización detallada del área de estudio



Elaboración propia

Desde un punto de vista geográfico, la zona de estudio se encuentra en la zona de transición entre las estribaciones occidentales de los montes de Málaga y el valle del Guadalhorce. En esta zona el río gana amplitud en su cauce y aumenta su zona de influencia al salir a la zona de valle y recibir aportes de una serie de arroyos y barrancos (arroyo Piedra Horadada y arroyo de los Pilones).

La cuenca del río Campanillas tiene una superficie de 28.320 hectáreas. No obstante, su cuenca alta se encuentra parcialmente desconectada de la cuenca baja por el embalse de Casasola, que actúa como elemento de retención de las aguas en el caso de avenida (Figura 2). Este embalse tiene una capacidad de 23,6 hm³ y se sitúa a 12 km aguas arriba de la zona de estudio. Además, dentro de la cuenca del río Campanillas también se encuentra el embalse de El Tomillar, sobre el cauce del arroyo de los Pilones, con una capacidad de 2,9 hm³ y situada en la margen derecha del río, a 3 kilómetros aguas arriba de su desembocadura en el río Campanillas (Valle Martínez, 2017).

El régimen hidrológico del río es plenamente mediterráneo, caracterizado por su carácter estacional e intermitente, dada la sequía estival propia de la región. Este carácter se ve potenciado por la regulación de los caudales que suponen los embalses de Casasola y El Tomillar, dando como resultado que durante la mayor parte del año el río se encuentre seco y únicamente fluyan caudales por él cuando se producen precipitaciones de cierta entidad. Los embalses en clima mediterráneo producen la inversión del régimen hidrológico o igualan el caudal mensual al módulo anual.

El relieve de la cuenca del río Campanillas es marcadamente accidentado, con una litología pizarrosa de baja permeabilidad y con zonas de arcillas y yesos del Permo-Trías muy inestables en pendientes. Además, la cobertura vegetal es exigua y los suelos son de escaso desarrollo (Figura 3). A ello se suma un clima mediterráneo de precipitaciones torrenciales. Todo ello da lugar a un elevado coeficiente de escorrentía que origina importantes flujos superficiales en caso de precipitaciones. El valor medio del umbral de escorrentía para la cuenca hidrológica del área de estudio es de 40,47 l/m² (Figura 3).

A su paso por la zona de estudio, el río Campanillas discurre principalmente por terrenos de cultivo y zonas urbanas, que en algunos casos se extienden por la llanura de inundación e incluso por el propio cauce. El distrito de Campanillas está compuesto por el núcleo principal (barriada de Campanillas) y por una serie de barrios: El Prado y El Brillante, en la margen derecha del río, y Huertecillas de Mañas, Oliveros y Pilar del Prado, en la margen izquierda. En total suman 19.516 habitantes (año 2022). Además, al norte, muy próximo a la barriada de Campanillas, se encuentra el Parque Tecnológico de Andalucía, uno de los principales parques industriales y tecnológicos de Andalucía (Figura 2).

A lo largo de la cuenca baja del río, este discurre paralelo a la carretera A-7058, que conecta el municipio de Almogía con el valle del Guadalhorce. Además, a su paso por Campanillas, el río es atravesado por el puente de la carretera A-7054, que une Campanillas con los barrios de la margen derecha y con el resto del término municipal de Málaga.

2.2. Materiales y fuentes de análisis del área de estudio

Para la representación e interpretación del área de estudio se han realizado una serie de cartografías de caracterización hidro-geomorfológica, a partir de los siguientes materiales y fuentes:

- Modelo Digital del Terreno escala 1/1.000, a partir de diferentes vuelos fotogramétricos incluidos en el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía de la Junta de Andalucía.
- Litologías. Mapa geológico de España a escala 1/50.000. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España.
- Usos del suelo. Proyecto Siose Andalucía. Escala 1/10.000. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía de la Junta de Andalucía.

Por otro lado, se ha realizado un análisis hidrológico de la cuenca del área de estudio (hasta el embalse de Casasola). Este análisis permite, asimismo, estimar los caudales resultantes en el evento considerado en este trabajo, dado que no se disponen de datos reales de caudal. Se ha usado la metodología del *Soil Conservation Service* (USDA), adaptada al método racional modificado por Témez, según norma 5.2-IC de Drenaje superficial de la Instrucción de carreteras (Orden FOM/298/2016). Con los datos de precipitación de las 24 horas previas al pico de crecida, detallados más adelante, y los datos geomorfológicos de la cuenca, se ha calculado el tiempo de concentración, la intensidad media de la precipitación correspondiente a dicho tiempo de concentración, el umbral de escorrentía, el coeficiente de escorrentía y el caudal. Además, usando

la publicación 'Máximas lluvias diarias en la España peninsular' (Ministerio de Fomento, 1999) se ha estimado el periodo de retorno aproximado que supone dicha precipitación para la zona.

Los datos de precipitaciones y de embalses se han obtenido del Sistema automático de información hidrológica (S.A.I.H.) Hidrosur, de la Dirección General de Infraestructuras del Agua de la Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural de Andalucía³, y de Embalses.net.

2.3. Cartografía preventiva oficial de la zona

Esta es un tipo de cartografía temática orientada a la etapa final de un proceso de toma de decisiones sobre el territorio. A partir del diagnóstico que proporciona, se plasman y derivan decisiones territoriales de carácter normativo, tales como la clasificación del suelo en planes urbanísticos, la delimitación de espacios naturales, el trazado de infraestructuras o la delimitación de dominios públicos hidráulicos (Ojeda Zújar, 1999).

La zona de estudio aquí considerada está recogida en el Área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) ES060-ARPS-0049 ('Río Campanillas, desde aguas arriba de Campanillas hasta su desembocadura'), perteneciente a la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas. Esta cartografía se encuentra en el segundo ciclo, correspondiente al periodo 2022-2027, de la Planificación de la gestión del riesgo de inundación en las Cuencas Intracomunitarias de Andalucía (Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul, 2020). Actualmente, el segundo ciclo está en su última fase, a la espera de la publicación de la Declaración Ambiental Estratégica.

Los mapas de peligrosidad y el riesgo de inundación han sido realizados de conformidad con lo dispuesto en los artículos 8 y 9 del Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, y los criterios establecidos al respecto por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Para el tramo fluvial estudiado existe cartografía para periodos de retorno de 10, 50, 100 y 500 años. El caso real que se va a considerar para testear los resultados equivale a un periodo de retorno algo inferior al de 25 años, por lo que se ha trabajado con los mapas de inundación fluvial para los periodos de retorno más próximos, de 10 y 50 años.

2.4. Cartografía unievento, considerando el episodio pluviométrico del 25 de enero de 2020

Se ha realizado una delineación de la lámina inundable resultante del episodio tormentoso que aconteció el día 25 de enero de 2020. Para la obtención de esta lámina se han usado imágenes y vídeos disponibles en Internet, así como también se han obtenido datos empíricos en trabajo de campo. El uso masivo de las redes sociales por parte de la población en estos sucesos permite disponer de una amplia base de datos visual, tanto durante el propio evento como en las horas inmediatamente posteriores. De especial utilidad ha resultado un vuelo en helicóptero de la Policía Nacional de la mañana siguiente a la tormenta, mientras coordinaba la atención a las víctimas (La Opinión de Málaga, 2020).

La información hidrológica sobre dicho evento se ha obtenido de las tres estaciones meteorológicas más próximas al área de estudio con información pluviométrica horaria: IFAPA Centro de Campanillas, Presa de Casasola y Puerto de la Torre (Figura 2).

En cuanto al trabajo de campo, se han realizado diversas visitas en los días posteriores, tomando referencias de los calados de la lámina inundable a partir de las marcas y manchas dejadas en paredes y mobiliario urbano. De igual modo, se han realizado entrevistas con vecinos de la zona afectada. De estas entrevistas se ha obtenido información de zonas afectadas y calados, así como valoraciones cualitativas sobre el modo en que se produjo el desastre: intensidad horaria de la avenida, direcciones de la corriente, daños y obturación de infraestructuras, etcétera.

3. Resultados

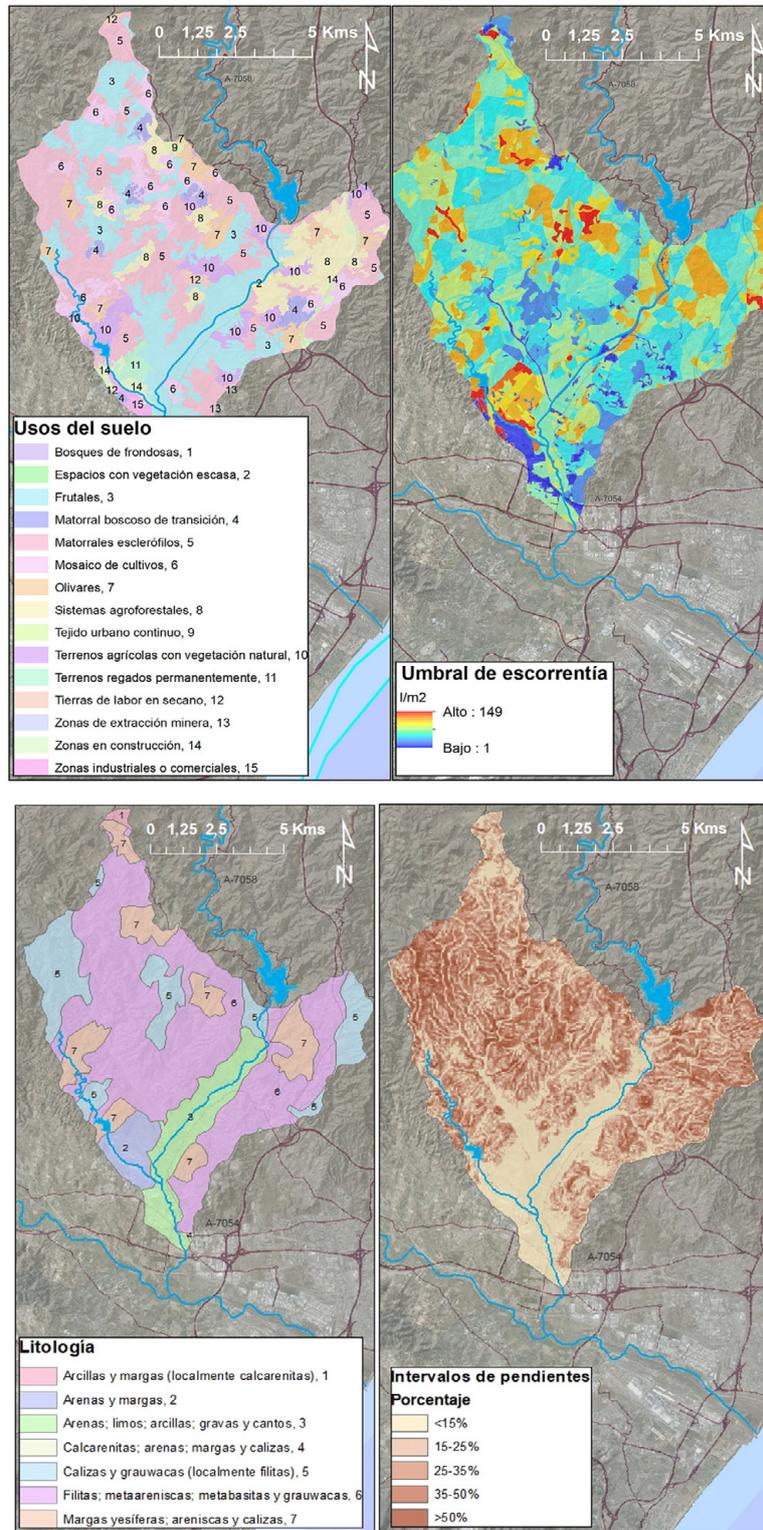
En este apartado se ha descrito la hidrología del área de estudio y la inundación producida el día 25 de enero de 2020, así como se ha comparado esta última con la cartografía normativa existente. En los siguientes apartados, de discusión de resultados y conclusiones, se exponen y discuten las posibles causas de la disparidad y las potenciales líneas de mejora y ajuste.

³ <http://www.redhidrosurmedioambiente.es/saih/mapa/tiempo/real/sistema/cma>

3.1. Caracterización hidro-geomorfológica del área de estudio

Atendiendo a los datos de precipitaciones horarias acumuladas en las estaciones meteorológicas más próximas al área de estudio en las 24 horas previas al desbordamiento (Tabla 2), a los datos geomorfológicos de la cuenca (Figura 3) y a la metodología ya descrita anteriormente, se han obtenido los siguientes valores hidrológicos y geomorfológicos para el área de estudio:

Figura 3. Caracterización hidro-geomorfológica del área de estudio (litología, pendientes, usos del suelo, umbral de escorrentía)



Elaboración propia

Tabla 1. Valores hidrológicos y geomorfológicos para el área de estudio

Precipitación acumulada 24 horas (l/m ²)	129,3
Superficie de la cuenca (km ²)	98,700
Longitud de cauce (km)	16,738
Cota cabecera (km)	0,624
Cota intersección (km)	0,021
Desnivel (km)	0,603
Pendiente media (%)	3,6
Tiempo de concentración (h)	4,8
Intensidad media de la precipitación correspondiente al Tc (mm/h)	18,9
Umbral de escorrentía (l/m ²)	40,47
Coefficiente de escorrentía	0,45
Caudal (m ³ /s)	311,35

Elaboración propia

3.1. Inundaciones 25 de enero de 2020

El día 22 de enero de 2020 comenzó a llover con persistencia en la provincia de Málaga, saturando progresivamente los suelos de la cuenca del río Campanillas y aumentando progresivamente su caudal, hasta que en la madrugada del día 25 este desbordó, coincidiendo con un pico de mayor intensidad pluviométrica entre las 3 y las 6 de la mañana⁴ (Tabla 2 y Figura 4).

En las 24 horas previas al desbordamiento, la precipitación media en la cuenca⁵ fue de 129,3 l/m², cantidad que oscila entre la estimada para un periodo de retorno de 10 años (105,97 l/m²) y 25 años (133,25 l/m²) (Tabla 2). Esto supuso un caudal punta en el cauce de 311,35 m³/s.

Tabla 2. Precipitaciones acumuladas en las estaciones meteorológicas más próximas al área de estudio en las 24 horas previas al desbordamiento

Estación meteorológica	Precipitaciones acumuladas entre las 3:00 y las 6:00 del día 25 de enero de 2020	Precipitaciones acumuladas en las 24 horas previas al desbordamiento	
		Precipitaciones	Periodo de retorno equivalente
IFAPA Centro de Campanillas	89,9 l/m ²	139,8 l/m ²	25-50 años
Presa de Casasola	78,7 l/m ²	104,7 l/m ²	≈ 10 años
Puerto de la Torre	94,4 l/m ²	143,4 l/m ²	25-50 años
Valor medio para la cuenca fluvial del área de estudio		129,3 l/m ²	10-25 años

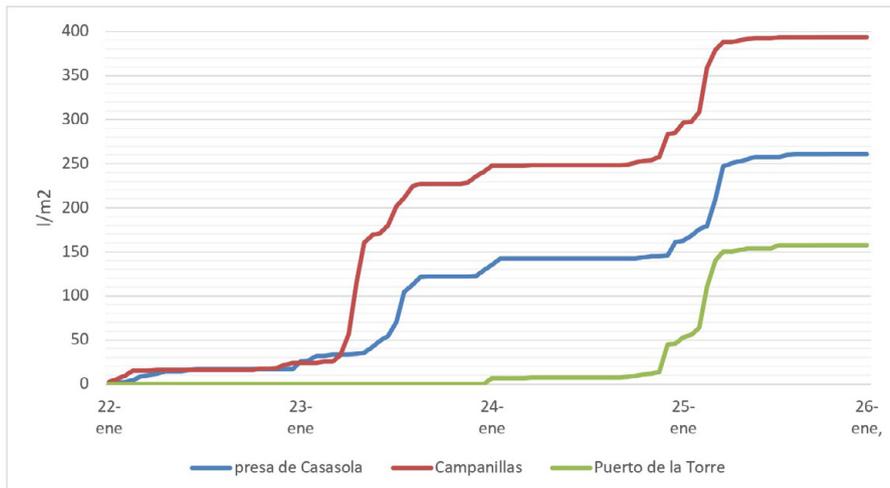
Fuente: datos pluviométricos horarios de las estaciones consideradas (S.A.I.H. Hidrosur). Elaboración propia

Las principales inundaciones se produjeron en el entorno de la barriada de Campanillas, donde el cauce aparece constreñido entre el desarrollo urbanístico de su orilla derecha y el relieve del Cerro Vallejo en su orilla izquierda (Figura 5). Afortunadamente no hubo que lamentar daños personales, pero sí cuantiosos daños materiales que afectaron a 850 familias, valorados en 10,7 millones de euros según estimaciones del Consorcio de Seguros (Sánchez, 2021). La zona más afectada fue la conocida como 'El brillante', donde además del uso residencial también se localizan un colegio, un centro de enseñanza secundaria, una guardería, un centro de servicios sociales y el edificio de la policía local de Campanillas. Por todo ello, la vulnerabilidad es máxima, no solo por el tipo de población dependiente afectada, sino también por quedar aislada la propia policía local, limitando su acción de rescate.

4 Según estudio hidrológico hecho con el método racional modificado por Témez para el área de estudio, el tiempo de concentración es de 4 horas y 48 minutos. Fernández-Palacios Serrano (2017), en un estudio similar, lo establece también en 4 horas.

5 Cuenca fluvial excluyendo la superficie de drenaje aguas arriba de los embalses.

Figura 4. Precipitaciones acumuladas en las estaciones meteorológicas más próximas al área de estudio entre los días 22 y 26 de enero



Fuente: datos pluviométricos horarios de las estaciones consideradas (S.A.I.H. Hidrosur). Elaboración propia

Figura 5. Recreación de la lámina unievento con direcciones de flujos de inundación



Fuente: Google Earth *renderizada*. Elaboración propia

Un aspecto que resulta destacable de las entrevistas tenidas con los vecinos afectados es la coincidencia en describir que el agua no les venía directamente del cauce del río, sino desde el norte, y que el desbordamiento principal se produjo en la zona conocida como ‘Las bodegas’, donde el arroyo de los Pílonos confluye con el río Campanillas (Figura 4). Esta descripción, además, concuerda con otras inundaciones históricas anteriores. El arroyo de los Pílonos cruza el Parque Tecnológico de Andalucía encauzado, y apenas 300 metros antes de su desembocadura en el río Campanillas recupera su cauce natural, con una sección hidráulica considerablemente menor y un índice de rozamiento mayor, lo que frena bruscamente la velocidad del flujo del tramo encauzado y genera una gran bolsa de agua. El camino de Adonis y otras vías urbanas, a su vez, facilitaron el discurrir del agua desbordada hacia el entramado urbano de Campanillas.

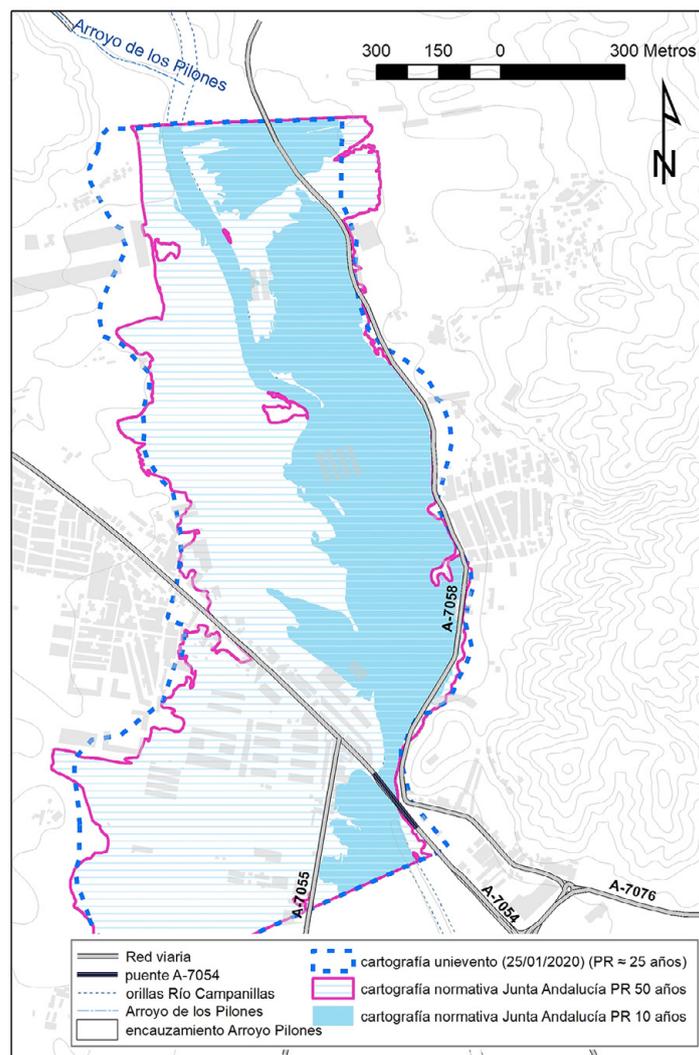
Asimismo, a partir de las conversaciones con los vecinos se ha podido deducir que el puente de la carretera A-7054 sobre el río Campanillas se obturó completamente en los dos ojos laterales y parcialmente en dos de los tres ojos centrales.

Atendiendo, por último, a episodios similares anteriores en el área de estudio, Fernández-Palacios Serrano (2017) cita dos eventos similares en febrero de 2010 y diciembre de 2016. Según el autor se correspondieron con periodos de retorno de 7 años. En ambos eventos la inundación no fue tan intensa como la de 2020, aunque la margen derecha del río llegó a desbordar con calados de 1 metro en la margen derecha del río, en la zona de 'El Brillante', produciéndose importantes daños materiales. Respecto a la confluencia del Arroyo Los Pilonos con el Río Campanillas, también lo destaca como un área de especial peligrosidad, indicando que pueden alcanzarse calados de hasta 6 metros para periodos de retorno entre 100 y 500 años.

3.2. Comparativa del evento de 2020 con la cartografía normativa de la Junta de Andalucía

Comparando las láminas de área inundable de las distintas cartografías citadas se desprenden diferencias muy significativas entre unas y otras, destacándose, en líneas generales, que la cartografía normativa minusvalora el riesgo real (Figura 6). La mancha inundable de esta cartografía es inferior a la inundación real (equivalente a un periodo de retorno algo inferior a 25 años) tanto en el supuesto del periodo de retorno de 50 años como en el de 10 años. En el primer caso (50 años) se observa una mayor aproximación, aunque deja sin cubrir algunas zonas que realmente se inundaron, especialmente en la orilla derecha, donde el embalsamiento y deriva del flujo que se produjo en la confluencia del arroyo de los Pilonos con el río Campanillas resulta insuficientemente recogido (Figura 5). Para el caso del mapa equivalente al periodo de retorno de 10 años, la diferencia es bastante mayor.

Figura 6. Cartografía unievento y cartografía normativa para los periodos de retorno de 10 y 50 años



Elaboración propia

4. Discusión de resultados

A raíz de todo lo anterior, cabe plantearse las razones que puedan estar detrás de las diferencias y desajustes hallados para poder plantear acciones propositivas que mejoren el ajuste de las cartografías normativas de peligrosidad de inundación en entornos mediterráneos. Este tipo de incongruencias entre cartografías oficiales y eventos reales ya han sido apuntadas previamente por otros autores, como Camarasa y Bescós (2004) o Hernández-Mora et al. (2021).

Podrían reunirse las posibles causas en dos grupos de razones diferenciados: el propio modelo hidrológico-hidráulico usado en la cartografía normativa, y las particularidades de la peligrosidad de inundación en entornos mediterráneos.

4.1. Causas relacionadas con el modelo hidrológico-hidráulico usado en la cartografía normativa

- Los modelos hidrológico-hidráulicos se ciñen a un ámbito territorial concreto y cerrado, sin contemplar lo que ocurre aguas arriba o aguas abajo de dicho ámbito.

Aunque en el análisis hidrológico, para el cálculo del caudal resultante de la escorrentía pluvial, trabaje con la totalidad de la cuenca hidrográfica, para el análisis hidráulico se suele trabajar con tramos concretos que se ciñen exclusivamente a la zona que se pretende deslindar.

Tal como pasa en los ecosistemas, en el comportamiento hidráulico de ríos y arroyos existe una interconexión con la totalidad de la cuenca, de modo que cualquier cambio o alteración que se produzca en algún punto de dicha cuenca puede afectar aguas abajo o aguas arriba. Un buen ejemplo de esto se tiene en la situación ya descrita por los vecinos: la inundación de enero de 2020 en la barriada de Campanillas recibió dos flujos de escorrentía diferentes: el propio del río Campanillas, al desbordar a su paso por la barriada, y el flujo procedente del arroyo de los Pilonos (Figura 5). El arroyo de Los Pilonos fue deslindado y encauzado en su día para el desarrollo urbanístico del Parque Tecnológico de Andalucía (PTA). En su recorrido por dicho Parque Tecnológico se le creó un canal amplio y recto, de mampostería, libre de vegetación. Durante un tramo de 2 kilómetros, las aguas discurren con una gran sección hidráulica y sin rozamiento, a gran velocidad. Pero al finalizar dicho encauzamiento, y durante los 300 metros últimos del arroyo antes de desembocar en el río Campanillas, el arroyo recupera su sección original, mucho más estrecha, y con densa vegetación. Esto supone una alteración importante del comportamiento hidráulico del arroyo, al acelerarse su flujo artificialmente, para luego frenarse con brusquedad. Cuando se realizó el deslinde de este arroyo, se trabajó con un área cerrada y específica: los suelos urbanizables del PTA, y no se tuvo en consideración su repercusión aguas abajo. Desde entonces, las inundaciones en la barriada de Campanillas presentan una recurrencia y gravedad que nunca habían tenido anteriormente.

- El estudio hidrológico trabaja con datos estadísticos de máximas lluvias diarias, en 24 horas, sin tener en consideración, de manera suficiente o adecuada, las lluvias de días precedentes.

Si bien la 'Instrucción de Carreteras', norma que rige la elaboración de los estudios hidrológico-hidráulicos en España (Ministerio de Fomento, 2016), tiene en consideración un factor corrector de la humedad del suelo para distintas regiones en España, esto es un valor estadístico insuficiente en casos como el que nos ocupa. Así, antes de producirse las inundaciones estuvo lloviendo con persistencia e intensidad durante los 3 días previos. Durante estos días se produjeron lluvias equivalentes a periodos de retorno que oscilan entre los 2 y 10 años según el día y la estación pluviométrica considerada. Este hecho saturó completamente los suelos, dando lugar a una escorrentía de prácticamente el 100% del agua precipitada en la jornada del 25 de enero. Bien es cierto que resulta difícil prever este hecho por su variabilidad, pero tal vez sería conveniente corregir al alza estos factores para situarnos siempre del lado de la seguridad.

- De igual modo, la cartografía normativa no tiene en consideración acciones antrópicas indirectas, pero con una relación muy estrecha con la peligrosidad de inundabilidad. Así, el estudio hidrológico no contempla potenciales aportaciones de caudal como las que se pudieron producir por la apertura de los embalses de 'Casasola' o 'El Tomillar'.

Según los vecinos, en la madrugada del 25 de enero se generó una ola repentina y significativa en el caudal, que achacan a la apertura de los órganos de desagüe de alguno de estos embalses. La administración hidráulica competente en la zona niega que ninguna de estas presas se abriera (Stuber, 2020). Lo más probable es que dicha "ola" se produjera por el pico de mayor intensidad pluviométrica que se dio entre las 3 y

las 6 de la mañana. Durante estas horas se acumularon 78,7 l/m³ en la estación pluviométrica de Casasola, 89,9 l/m³ en la de Campanillas y 94,4 l/m³ en la de Puerto de la Torre.

En cualquier caso, el embalse de Casasola, por características geológicas del terreno no previstas durante su construcción, no debería superar los 10,9 hm³ de agua (Blanco, 2007), y durante el episodio del 25 de enero de 2020 llegó a alcanzar los 17 hm³ (Lillo, 2020). Esto enlaza con un segundo riesgo no previsto en la cartografía normativa: más allá de la posibilidad de que tengan que abrirse embalses para aliviarlos cuando están próximos a llenarse durante eventos pluviométricos extremos, también existe el riesgo de que una presa pueda llegar a colapsar o desbordar, y soltar su contenido de manera repentina. Algo similar podría haberse dado —afortunadamente no fue así— con el embalse de ‘El Tomillar’, cuya presa está hecha de tierra y “materiales sueltos”, que podrían fácilmente llegar a colapsar si llegara a llenarse y desbordar por coronación. A raíz del episodio aquí descrito, la Junta de Andalucía ha reforzado la seguridad del embalse de Casasola⁶.

- En último lugar, cabe destacar que **no se consideran las alteraciones del flujo de inundación por los circuitos artificiales de la trama urbana.**

En medios muy artificializados, como es nuestra área de estudio, se debería tener en consideración la estructura urbana. Más allá del modelo digital del terreno y de los ‘*blocked obstructions*’ (elementos antrópicos donde no existe “transporte de flujo”), la realidad urbana y periurbana es considerablemente más compleja, produciéndose importantes alteraciones en la dirección, velocidad y calado del flujo (Cantarero, 2013). Esto genera efectos en cadena imprevisibles en la modelización actual.

A modo de ejemplo, en el caso se ha citado anteriormente del flujo llegado desde el arroyo los Pilonos, la existencia del ‘Camino de Adonis’ podría haber actuado como un falso encauzamiento por la inexistencia de obstáculos y el menor rozamiento del asfalto (Figura 5). Además, al confluir el Camino de Adonis con la avenida principal, Calle José Calderón, se produce un represamiento del flujo, que eleva notablemente el calado, con una altura de inundación superior al de zonas adyacentes (incluso más próximas al río) (ver punto ‘1’ en Figura 7). Esto pudo observarse tanto en las marcas del barro en el mobiliario urbano como en las fotos de los vecinos durante la inundación. En estas últimas también son apreciables las turbulencias y cambios de régimen de flujo creados en el agua. Los solares, calles y espacios intersticiales existentes en el entorno luego reconducen el flujo generando zonas de mayor y menor afección. Así, el muro del colegio Francisco Quevedo está directamente conectado con este punto de peligrosidad (ver punto ‘2’ en Figura 7), resultando una de las zonas más dañadas (Figura 8).

Figura 7. Recreación lámina unievento y puntos destacables de modificación del flujo por interferencias urbanas



Elaboración propia

⁶ Proyecto de prevención y gestión de catástrofes de la presa de Casasola (Málaga). Expediente A6.829.033/2111

Figura 8. CEIP Francisco Quevedo tras las inundaciones



Fuente: Jorge Zapata/Agencia EFE

Otro ejemplo destacable es la confluencia del flujo de desbordamiento del río Campanillas con los primeros edificios de la zona 'El Brillante'. La lámina, que circula de manera expandida por la zona agrícola de la llanura de inundación, queda constreñida y represada entre el Instituto de Enseñanza Secundaria 'Torre del Prado' y las viviendas de la calle Cristobalina Fernández, incrementándose el calado y los daños (ver punto '3' en Figura 7).

En los distintos casos expuestos, el flujo de inundación no se expande ni comporta como lo prevé la cartografía predictiva, sino que sufre alteraciones de dirección, calado y velocidad que transforman de manera notable las láminas y profundidades. Estas alteraciones podrían ser fácilmente previsibles con un estudio específico de la zona atendiendo a la trama urbana y los condicionantes antrópicos específicos, incorporando a los modelos digitales de elevaciones procedentes del LiDAR los detalles de la trama urbana con toda su complejidad (Bodoque et al., 2023).

4.2. Causas derivadas de las particularidades de la peligrosidad de inundación en entornos mediterráneos

El elevado coeficiente de escorrentía, ya citado en la descripción del área de estudio, genera importantes flujos de avenida. A ello se suman los frecuentes movimientos en masa debidos a la inestabilidad de las arcillas y yesos del Permo-Trías, que además aportan material sólido potencialmente transportable y depositable por la red fluvial. De otro lado, la elevada presión demográfica y económica de la zona añade otras circunstancias de carácter antrópico, como son la impermeabilización del suelo y la invasión del territorio fluvial por desarrollos urbanísticos, agrícolas o industriales. Todo ello propicia la recurrencia y gravedad de las inundaciones, pero también la de otros riesgos como los movimientos en masa o la erosión hídrica.

Estas características, en cualquier caso, son extensibles a buena parte de la fachada mediterránea, donde los riesgos naturales causan pérdidas económicas, y en ocasiones incluso pérdida de vidas humanas, con mucha más frecuencia que en otras regiones. No obstante, cualquier cuenca hidrográfica en España responde a una misma normativa y a un mismo modelo hidrológico-hidráulico (con matizaciones menores), sin tener en consideración las notables diferencias que existen entre unas y otras regiones en la casuística que genera y condiciona el desarrollo de las inundaciones.

- **En entornos mediterráneos, las inundaciones se ven frecuentemente agravadas y alteradas en su comportamiento por la activación paralela y sinérgica de otros peligros asociados a la inundación, originados por el mismo episodio tormentoso.**

Se puede afirmar que aquí, tanto más que en otras regiones, los riesgos están estrechamente relacionados el territorio, con efectos en cadena y sinergias que incrementan la peligrosidad y la lámina inundable resultante (Gallegos Reina & Perles Roselló, 2022; Perles Roselló & Cantarero Prados, 2010). Esto no está recogido en

la cartografía oficial. Las únicas especificidades regionales se incluyen en el análisis hidrológico⁷, pero no en el estudio hidráulico.

Figura 9. Imagen aérea del puente de la carretera A-7058 sobre el río Campanillas, el día 30 de enero de 2020



Apréciense los depósitos de sedimentos acumulados antes del puente, obturando su capacidad de paso y dando lugar a anegamientos en ese mismo punto aún 5 días después de las inundaciones.

Fuente: Málaga Hoy (Sánchez, 2021)

De entre estos peligros asociados destacan la erosión hídrica y los deslizamientos de laderas. El primero es, sin duda, el más importante. En entornos mediterráneos la erosión hídrica es muy elevada (Gallegos Reina, 2023; Camarasa Belmonte et al., 2018; Sanchís Ibor et al., 2017; Panagos et al., 2015; García Ruíz et al., 2013; Conesa García et al., 2011; Lavee et al., 1998), y ello conlleva un aumento de la carga sólida y energía erosiva del caudal, dando lugar a problemas de atarramiento, socavación y colapso de puentes y entubamientos (Figura 9). Asimismo, reduce la sección hidráulica del cauce y disminuye la velocidad del flujo, aumentando con ello el calado (Díez Herrero et al., 2008a).

Figura 10. Signos de deslizamiento junto al cauce del arroyo Los Pilonos



Fuente: Google Earth

⁷ La Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 -IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras, tiene en consideración, para el análisis hidrológico, aspectos regionales como la torrencialidad pluviométrica.

Otro peligro asociado muy frecuente es el deslizamiento de laderas (Gallegos Reina, 2022; Corominas et al., 2016; Díez Herrero et al., 2008b; Pita et al., 1999). Por citar un ejemplo concreto del área de estudio, el afluente 'Los Pilones' atraviesa una zona de arcillas y yesos permotriásicos. Esta es una serie de elevada inestabilidad en pendientes, que en este caso superan el 50%. Sobre el terreno se pueden apreciar signos de desplazamiento de tierras junto al cauce (Figura 10). Estos deslizamientos pueden llegar a bloquearlo, con una doble consecuencia: de un lado, el anegamiento de zonas que no son previstas en la simulación hidráulica, y posteriormente, al romperse bruscamente el tapón se puede producir un repentino pico de crecida de agua y barro con gran potencial destructivo.

Los modelos hidráulicos normalmente simulan flujos hídricos de agua sin ninguna carga sedimentaria ('aguas claras o limpias'), sin transporte de sedimentos y material leñoso como carga de fondo, suspensión o flotación. Estos escenarios son muy diferentes de los casos reales de las inundaciones, donde la carga del flujo cambia significativamente las características reológicas del flujo, y con ello las velocidades, calados y área inundada.

Por último, pero no menos importante, los modelos hidráulicos de simulación hidrodinámica normalmente consideran el lecho fijo, sin que se produzcan cambios morfológicos previos ni durante la avenida (por erosión o sedimentación de carga sólida inorgánica o leñosa, u objetos artificiales), que cambian totalmente la configuración geométrica de las zonas inundables.

- La modelización de las obras estructurales en entornos mediterráneos no está adaptada a las condiciones rexistásicas de estos.

Ni el dimensionamiento ni la modelización hidráulica de las obras de paso tienen en consideración las particularidades rexistásicas de los medios mediterráneos. La sección hidráulica de los puentes y entubamientos se diseñan atendiendo a simulaciones hidrológicas con periodos de retorno extraordinarios, de 500 años, pero con frecuencia unos y otros resultan cegados y desbordados con precipitaciones muy inferiores a esos 500 años. Esto se debe a que se trabaja con la idea de que por los cauces discurrirá agua "limpia", lo que dista bastante de la realidad en entornos mediterráneos, dado que la carga de material sólido es bastante importante (Liu et al., 2022; Contreras & Escauriza, 2020; Nones, 2019). Este material sólido está compuesto principalmente por el arrastre de suelos por la erosión hídrica y por el arrastre de material leñoso (insuficientemente enraizado, en suelos demasiado delgados).

En el caso que nos ocupa, y atendiendo a la descripción de los vecinos, el puente sobre la carretera A-7054 se obturó completamente en dos de sus cinco vanos y parcialmente en otros dos. En este hecho se encuentra con toda probabilidad una de las principales razones de la infraestimación de la cartografía normativa frente a lo que realmente ocurrió.

Siguiendo esta misma línea, estudios como los de Eguibar et al. (2021) ponen de manifiesto situaciones similares a las aquí observadas en otras áreas mediterráneas, con efectos de cuellos de botella debido a infraestructuras transversales (puentes y carreteras) que provocan aumentos de los calados aguas arriba por la curva de remanso del flujo.

En su conjunto, los resultados obtenidos en este trabajo siguen también los mismos patrones ya expuestos por Camarasa Belmonte y Bescós en su análisis comparativo entre mapas de peligrosidad e inundaciones reales (2004), tanto en relación a la subestimación de la mancha inundable como en relación a la necesidad de considerar aspectos como la dinámica fluvial o las alteraciones antrópicas.

5. Conclusiones

A la vista de los resultados derivados de este trabajo, se ha puesto de manifiesto la necesidad de ajustar y mejorar la metodología seguida para la realización de cartografías preventivas oficiales de peligrosidad de inundaciones que se usa actualmente en España, especialmente en entornos mediterráneos, dando más peso en las cartografías finales a los métodos geomorfológicos e históricos, y menos a los hidrológico-hidráulicos, no adecuadamente implementados. Los actuales modelos subvaloran las consecuencias y láminas finales de inundación, confirmándose de tal modo la hipótesis de partida.

Esto se ha observado tras realizar un análisis comparado de la cartografía normativa y la inundación real. Además, se han extraído y discutido una serie de causas que pueden estar detrás de tales diferencias. Y, por último, en este apartado, se exponen algunas acciones propositivas que pudieran mejorar la predicción de áreas inundables en la cartografía oficial.

En la comunidad autónoma andaluza la cartografía oficial no es ajena a esta subestimación, y se trata de compensar alterando los valores de los parámetros reales de cálculo de la escorrentía que se usan en el estudio hidrológico. No obstante, esto solo desvirtúa el resultado final, generando una falsa idea de seguridad que en ríos y ramblas mediterráneas no suele alcanzarse con esta medida, y que en cuencas no mediterráneas alteran igualmente, esta vez por exceso, el resultado final de la mancha inundable. Así, por ejemplo, el umbral de escorrentía resultante para la cuenca de estudio es de 40,47 l/m², si bien en la cartografía oficial ha sido rebajado a 25 l/m². A pesar de ello, la cartografía oficial sigue estimando una lámina de inundación muy por debajo de lo que ocurrió en la realidad.

Por otro lado, debe tenerse en consideración que la región mediterránea es un área escasamente resiliente y especialmente sensible a los riesgos naturales (Olcina Cantos, 2008). Para el caso concreto de las inundaciones, la Comisión Europea incide en la necesidad de reforzar el estudio y conocimiento de sus particularidades territoriales para mejorar su análisis y gestión (Camarasa Belmonte, 2021; European Environment Agency, 2019). Aquí, más que en ninguna otra región, el Cambio Global ha tenido, y previsiblemente seguirá teniendo en las próximas décadas, una incidencia muy notable.

En relación a las acciones propositivas, parece necesario complementar el estudio hidrológico-hidráulico con otra serie de análisis. Ya hace algunos años se añadió la necesidad de hacer un estudio hidro-geomorfológico que complemente los resultados de la simulación hidráulica, pero esto resulta válido solo en entornos naturales, no así en entornos artificializados. Para estos casos sería conveniente tratar el problema con una perspectiva más realista y compleja, que podría abordarse con lo siguiente:

- **Incluir un estudio específico de la trama urbana y sus condicionantes, que incluya una incorporación de puntos antrópicos de interferencia y modificación del flujo**, yendo más allá de la mera consideración de los elementos antrópicos donde no existe transporte de flujo.
- **Analizar no solo las áreas receptoras de peligrosidad, sino también, especialmente, las causantes**. Estas pueden localizarse en la propia área de estudio o en cualquier otra zona anterior de la cuenca fluvial, tanto aguas arriba como aguas abajo.
- **Abordar el análisis de la carga sólida del caudal**, teniendo en consideración el aporte de sólidos por erosión hídrica, el aporte de restos leñosos y el aporte de elementos antrópicos de gran volumen. De igual modo, se deberían **estudiar otros peligros asociados que se puedan activar con el evento tormentoso, como deslizamientos de laderas**. Al respecto, Gallegos & Perles (2020) han presentado una metodología para el análisis integrado de peligros asociados a la inundación, con una propuesta adaptada a la ordenación territorial en regiones mediterráneas.
- Mejorar los resultados del estudio hidrológico **ajustando o ampliando el modo en que se calcula la condición de humedad antecedente**, para recoger la posibilidad de precipitaciones intensas o persistentes en la cuenca durante los días previos.
- **Incorporar parámetros de seguridad en las cuencas en las que existan embalses** o, incluso, estrechamientos del cauce en los que pudiera producirse un represamiento artificial del flujo.

Referencias

- Afzal, M. A., Ali, S., Nazeer, A., Khan, M. I., Waqas, M. M., Aslam, R. A., Cheema, M. J. M., Nadeem, M., Saddique, N., Muzammil, M., & Shah, A. N. (2022). Flood Inundation Modeling by Integrating HEC-RAS and Satellite Imagery: A Case Study of the Indus River Basin. *Water* (Switzerland), 14(19). <https://doi.org/10.3390/w14192984>
- Blanco, A. (2007, June 26). La presa de Casasola empieza a llenarse para traer agua a Málaga. *Diario 20 minutos*. <https://www.20minutos.es/noticia/252021/0/presa/casasola/llenarse/>
- Bodoque, J.M., Aroca-Jiménez, E., Eguibar, M.A., & García, J.A. (2023). Developing reliable urban flood hazard mapping from LiDAR data. *Journal of Hydrology*, 617, 128975. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128975>
- Boyte, C. (2014). *The Application of Direct Rainfall Models as Hydrologic Models Incorporating Hydraulic Resistance at Shallow Depths*. University of Queensland.
- Brunner, M. I., Slater, L., Tallaksen, L. M., & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *WIREs Water*, 8(3), 1–32. <https://doi.org/10.1002/wat2.1520>
- Camarasa Belmonte, A. M. (2021). Flash-flooding of ephemeral streams in the context of climate change. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 47, 121-142. <http://doi.org/10.18172/cig.4838>
- Camarasa Belmonte, A. M. & Bescós, A. (2004). Cartografía de áreas inundables: comparación entre mapas de peligros y mapas de inundaciones concretas. In G. Benito & A. Díez Herrero (Eds.), *Riesgos Naturales y Antrópicos en Geomorfología* (pp. 25-36). SEG y SCIC. <http://roderic.uv.es/handle/10550/40120>
- Camarasa Belmonte, A. M., Caballero López, M. P., & Iranzo García, E. (2018). Cambios de uso del suelo, producción de escorrentía y pérdida de suelo. Sinergias y compensaciones en una rambla mediterránea (Barranc del Carraixet, 1956-2011). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 78, 127–153. <http://dx.doi.org/10.21138/2714>
- Cantarero, F. (2013). *Relaciones entre el patrón territorial y la generación del peligro de inundación. Análisis comparado de casos en Málaga (España) y Motozintla (México)* [Tesis doctoral, Universidad de Málaga]. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=257203>
- Cea, L., Bermúdez, M., Puertas, J., Bladé, E., Corestein, G., Escolano, E., Conde, A., & Ahmadian, R. (2016). IberWQ: new simulation tool for 2D water quality modelling in rivers and shallow estuaries. *Journal of Hydroinformatics*, 18(5), 816–830. <https://doi.org/10.2166/hydro.2016.235>
- Chu, H., Wu, W., Wang, Q. J., Nathan, R., & Wei, J. (2019). An ANN-based emulation modelling framework for flood inundation modelling: Application, challenges and future directions. *Environmental Modelling and Software*, 104587. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104587>
- Conesa García, C., García Lorenzo, R. (2011). Factores e índices de peligrosidad de las aguas de avenidas en cruces de carreteras con ramblas. Estudio aplicado a la vertiente litoral sur de la región de Murcia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos españoles*, 57, 195-218.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (2012). Decreto 189/2002, de 2 de julio, del plan de prevención de avenidas e inundaciones en cauces urbanos andaluces. BOJA núm. 91, de 3 de agosto de 2002.
- Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul de la Junta de Andalucía (2020). Mapas de peligrosidad por inundaciones y de riesgo de inundación de la demarcación de las cuencas mediterráneas andaluzas. 2º ciclo. <https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/2021-07/Memoria%20de%20los%20Mapas%20CMA%202%20C2%20BA%20Ciclo.pdf>
- Contreras, M. T. & Escauriaza, C. (2020). Modeling the effects of sediment concentration on the propagation of flash floods in an Andean watershed. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 221–241. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-221-2020>
- Corominas, J., Mateos R.M., & Remondo, J. (2016). Review of landslide occurrence in Spain and its relation to climate. In K. Ho, S., Lacasse & L. Picarelli (Eds.), *Slope Safety Preparedness for Impact of Climate Change* (1a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315387789>

- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., & Petaccia, G. (2020). Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the art model. *Water* (Switzerland), 12(9), 1–19. <https://doi.org/10.3390/W12092326>
- Díez Herrero, A., Garrote, J., Baillo, R., Laín, L., Mancebo, M. J., & Pérez, F. (2008a). *Análisis del riesgo de inundación para planes autonómicos de protección civil: RICAM*. In I. Galindo, L. Laín & M. Llorente (Eds.), *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, 12, 53-70.
- Díez Herrero, A., Lain Huerta, L., & Llorente Isidro, M. (Editores) (2008b). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Dyhouse, G., Hatchett, J., & Benn, J. (2003). *Floodplan modeling using HEC-RAS*. Haestad Press, CT, 1–696.
- Eguibar, M. A., Porta García, R., Torrijo, F. J., & Garzón Roca, J. (2021). Flood Hazards in Flat Coastal Areas of the Eastern Iberian Peninsula: A Case Study in Oliva (Valencia, Spain). *Water*, 13(21), 2975. <https://doi.org/10.3390/w13212975>
- European Environment Agency (2019). *River floods, climate change adaptation*. *Water and Marine Environments*.
- Fernández-Palacios Serrano, M. (2017). *Análisis de inundabilidad en la cuenca baja del río Campanillas y afecciones a la zona urbana del Distrito de Campanillas (Málaga)*. [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Sevilla]. Depósito de Investigación Universidad de Sevilla. <http://hdl.handle.net/11441/65645>
- Gallegos Reina, A. & Perles Roselló, M.J. (2020). Metodología para el análisis integrado de peligros asociados a la inundación: propuesta adaptada a la ordenación territorial en regiones mediterráneas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 86. <https://doi.org/10.21138/bage.2950>
- Gallegos Reina, A. & Perles Roselló, M.J. (2021). Relationships between peri-urbanization processes and increases of multi-hazard. Diachronic analysis compared in peri-urban basins of the Mediterranean coast. *International Journal of Geo-Information*, 10(11), 1-21. <https://doi.org/10.3390/ijgi10110759>
- Gallegos Reina, A. (2021). Inundaciones en el litoral mediterráneo español en el actual contexto de Cambio Climático: orientaciones para su análisis y gestión. Estudio en la cuenca del arroyo Piletas (Málaga). *Ería, revista de Geografía*, 2021-1, 33-53. <https://doi.org/10.17811/er.1.2021.33-53>
- Gallegos Reina, A. (2022). *Ciudad difusa e inundaciones en el litoral mediterráneo: estudio de casos*. Editum, Ediciones de la Universidad de Murcia. <https://doi.org/10.6018/editum.2926>
- Gallegos Reina, A. (2023). Cambio en los patrones territoriales y análisis de inundabilidad y erodabilidad en cuencas de la provincia de Málaga, España (1956-2010). *Agua y Territorio*, 21, 69-83. <https://doi.org/10.17561/AT.21.6368>
- Gallegos Reina, A. & Perles Roselló, M.J. (2022). Problemáticas de los patrones y dinámicas territoriales periurbanos del litoral mediterráneo español frente a los riesgos naturales. Análisis aplicado en la provincia de Málaga. *Ciudad y Territorio. Estudios territoriales*, 54(211), 97-114. <https://doi.org/10.37230/CyTET.2022.211.6>
- García Ruíz, J.M., Nadal Romero, E., Lana Renault, N. & Beguería, S. (2013). Erosion in Mediterranean landscapes: changes and future challenges. *Geomorphology*, 198, 20-36. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.023>
- Hernandez-Mora, M., Meseguer-Ruiz, O., Karas, C., & Lambert, F. (2021). Estimating coastal flood hazard of Tossa de Mar, Spain: a combined model – data interviews approach. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04914-3>
- Jato-Espino, D., Sillanpää, N., Andrés-Doménech, I., & Rodríguez-Hernandez, J. (2018). Flood Risk Assessment in Urban Catchments Using Multiple Regression Analysis. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000874](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000874)
- La Opinión de Málaga (2020, January 28). Vista aérea de Campanillas tras la inundación. <https://www.youtube.com/watch?v=QSGVfxPPEVQ>
- Lavee, H., Imenson, A. C., & Sarah, P. (1998). The impact of climate change on geomorphology and desertification along a Mediterranean arid transect. *Land Degradation and Development*, 9, 407-422. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(199809/10\)9:5<407::AID-LDR302>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(199809/10)9:5<407::AID-LDR302>3.0.CO;2-6)

- Li, G., Liu, J., & Shao, W. (2022). Flood Risk Assessment Using TELEMAC-2D Models Integrated with Multi-Index Analysis in Shenzhen River Basin, China. *Water (Switzerland)*, 14(16). <https://doi.org/10.3390/w14162513>
- Lillo, I. (2020). La opinión de los técnicos: ¿Por qué se inundó la barriada de Campanillas el sábado? *Diario Sur*. <https://www.diariosur.es/malaga-capital/inundo-barriada-sabado-20200130000213-ntvo.html>
- Liu, J., Cao, Z., Li, X., Wang, W., Hou, J., Li, D., & Ma, Y. (2022). Modelling urban flooding integrated with flow and sediment transport in drainage networks. *Science of the Total Environment*, 850(June), 158027. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158027>
- Ministerio de Fomento (1999). *Máximas lluvias diarias en la España peninsular*. Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transporte. Dirección general de carreteras.
- Ministerio de Fomento (2016). Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. BOE núm. 60 de 10 de marzo de 2016.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023. <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/default.aspx>
- Namara, W. G., Damisse, T. A., & Tufa, F. G. (2022). Application of HEC-RAS and HEC-GeoRAS model for Flood Inundation Mapping, the case of Awash Bello Flood Plain, Upper Awash River Basin, Oromiya Regional State, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 1449–1460. <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01166-9>
- Nones, M. (2019). Dealing with sediment transport in flood risk management. *Acta Geophysica*, 67(2), 677–685. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00273-7>
- Ojeda Zújar, J. (1999). La cartografía temática: la interpretación frente a la métrica. *Andalucía Geográfica*, 5, 13-16
- Olcina Cantos, J. (2008). El Mediterráneo, región-riesgo: una visión desde España. In *España y el Mediterráneo, una reflexión desde la geografía española: aportación española al XXXI Congreso de la Unión Geográfica Internacional* (pp. 29-34). Comité Español de la Unión Geográfica Internacional.
- Oliva, A. & Olcina, J. (2023). Floods and Emergency Management: Elaboration of Integral Flood Maps Based on Emergency Calls (112)— Episode of September 2019 (Vega Baja del Segura, Alicante, Spain). *Water (Switzerland)*, 15(1), 2. <https://doi.org/10.3390/w15010002>
- Ongdas, N., Akiyanova, F., Karakulov, Y., Muratbayeva, A., & Zinabdin, N. (2020). Application of hec-rasHEC-RAS (2d) for flood hazard maps generation for yesil (ishim) river in kazakhstan. *Water (Switzerland)*, 12(10), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12102672>
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L. & Alewell, C. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*. 54, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Patel, D. P., Ramirez, J. A., Srivastava, P. K., Bray, M., & Han, D. (2017). Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5. *Natural Hazards*, 89(1), 93–130. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2956-6>
- Perles Roselló, M. J. & Cantarero Prados, F. J. (2010). Problemas y retos en el análisis de los riesgos múltiples del territorio: propuestas metodológicas para la elaboración de cartografías multi-peligros. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 52, 245-271. <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/1171>
- Pita, M. F., Caravaca, I., Feria, J. M., Alcalá, A., & Vallejo, I. (1999). Riesgos catastróficos y ordenación del territorio en Andalucía. Consejería de Obras Públicas Transportes. Junta de Andalucía.
- RD 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación
- Sánchez, S. (2021, January 17). Campanillas, un año después de las inundaciones de Gloria. *Diario Málaga Hoy*. https://www.malagahoy.es/malaga/Campanillas-inundaciones-Gloria_0_1538246364.html
- Sánchez, S. (2021, June 7). Málaga contrata una obra clave para reducir el riesgo de inundaciones en Campanillas. *Diario Málaga Hoy*. https://www.malagahoy.es/malaga/Malaga-contrata-obra-reducir-inundaciones-Campanillas_0_1581142431.html

- Sanchís Ibor, C., Segura Beltrán, F., & Almonacid Caballer, J. (2017). Channel forms recovery in an ephemeral river after gravel mining (Palancia River, Eastern Spain). *Catena*, 158, 357-370. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.012>
- Segura-Beltrán, F., Sanchis-Ibor, C., Morales-Hernández, M., González-Sanchis, M., Bussi, G., & Ortiz, E. (2016). Using post-flood surveys and geomorphologic mapping to evaluate hydrological and hydraulic models: The flash flood of the Girona River (Spain) in 2007. *Journal of Hydrology*, 541, 310-329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.039>
- Slater, L., & Villarini, G. (2017). On the impact of gaps on trend detection in extreme streamflow time series. *International Journal of Climatology*, (December 2016), 3976-3983. <https://doi.org/10.1002/joc.4954>
- Stefanidis, S., & Stathis, D. (2013). Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, 68(2), 569-585. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0639-5>
- Stuber, M. (2020, January 25). Juanma Moreno: «La presa de Casasola no se ha abierto en ningún momento». *Diario Sur*. <https://www.diariosur.es/malaga-capital/juanma-moreno-presa-20200125141914-nt.html>
- Valle Martínez, A. (2017). *Estudio hidrológico y de inundabilidad del Río Campanillas y análisis de soluciones técnicas para paliar los efectos de sus avenidas* [Proyecto Fin de Máster, Universidad de Sevilla]. Depósito de Investigación Universidad de Sevilla.
- Verbunt, M., Zwaafink, M. G., & Gurtz, J. (2005). The hydrologic impact of land cover changes and hydropower stations in the Alpine Rhine basin. *Ecological Modelling*, 187(1), 71-84. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.027>
- Wada, Y., Bierkens, M. F. P., Roo, A. De, Dirmeyer, P. A., Famiglietti, J. S., & Hanasaki, N. (2017). Human – water interface in hydrological modelling: current status and future directions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 4169-4193. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4169-2017>
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., & Vliet, M. T. H. Van. (2016). Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9, 175-222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>
- Yu, Y., Disse, M., Yu, R., Yu, G., Sun, L., Huttner, P., & Rumbaer, C. (2015). Large-scale hydrological modeling and decision-making for agricultural water consumption and allocation in the main stem Tarim River, China. *Water (Switzerland)*, 7(6), 2821-2839. <https://doi.org/10.3390/w7062821>

Análisis de las conductas de movilidad de los estudiantes de Geografía e Historia de la Universidad Pablo de Olavide

Analysis of the mobility behaviors of Geography and History students at the Pablo de Olavide University

AUTORÍA

Andreas Christian Hassold 

Universidad Pablo de Olavide, España.

Antonio Gavira Narváez 

Universidad Pablo de Olavide, España.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25758>

CITACIÓN

Hassold, A. C. & Gavira Narváez, A. (2024). Análisis de las conductas de movilidad de los estudiantes de Geografía e Historia de la Universidad Pablo de Olavide. *Investigaciones Geográficas*, (81), 71-92. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25758>

CORRESPONDENCIA

Antonio Gavira Narváez (angana@upo.es)

HISTORIA

Recibido: 16 agosto 2023

Aceptado: 11 enero 2024

Publicado: 26 enero 2024

TÉRMINOS

© Andreas Christian Hassold y Antonio Gavira Narváez

 Este trabajo se publica bajo una licencia Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Resumen

La movilidad juega un papel esencial en la vida cotidiana de la población, especialmente en el caso de los estudiantes que diariamente se ven obligados a desplazarse hasta sus centros de estudio. Se plantea el presente trabajo con el fin de conocer las conductas de movilidad de los estudiantes del Grado en Geografía e Historia y sus dobles grados de la Universidad Pablo de Olavide, así como el impacto que han tenido las medidas de bonificación de los medios de transporte. La localización de este campus universitario dentro de la aglomeración urbana de Sevilla, aunque fuera de los núcleos de población favorece que sea interesante esta primera aproximación a su estudio.

Los resultados obtenidos se han basado en la encuesta realizada a este conjunto de estudiantes, lo que ha permitido conocer que un 79 % se desplaza hasta la universidad en transporte público, mientras que los principales usuarios del vehículo privado son los residentes en municipios del área metropolitana con malas conexiones de transporte público. Por ello, entre otras medidas, se propone mejorar las conexiones de transporte público y crear rutas de autobús en las zonas que no tienen servicio de metro dentro de la ciudad de Sevilla.

Palabras clave: Universidad Pablo de Olavide; Sevilla; movilidad; estudiantes; sostenibilidad; transporte público; área metropolitana.

Abstract

Mobility plays an essential role in the daily life of the population, especially in the case of students who are forced to travel to their study centers each day. The main objective of this study is to comprehend the mobility behaviors of the students of the Degree in Geography and History and the double degrees of the Pablo de Olavide University, as well as the impact that the bonus measures for transport have had. The location of this university campus within the urban agglomeration of Seville but on the outskirts of the population centers makes this approach to its study interesting.

The results obtained have been derived from the survey carried out on this group of students, revealing that 79 % travel to the university by public transport, while the main users of private vehicles are residents of the municipalities located in the metropolitan area with poor public transport connections. For this reason, the measures proposed include

the improvement of public transport connections and the creation of bus routes in areas that do not have a metro service within the city of Seville.

Keywords: Pablo de Olavide University; Seville; mobility; students; sustainability; public transport; metropolitan area.

1. Introducción

En el mundo contemporáneo actual, globalizado e interconectado, una de las características fundamentales de la sociedad es la gran movilidad de personas y mercancías (Saladié & Jurado, 2015). La RAE, define la movilidad como el “desplazamiento de personas o cosas”. Autores como Gutiérrez (2012) la concreta como el *desplazamiento territorial como geografía de lugares de origen y destino de viaje (convencional del transporte), y como práctica social*. Todo ello, favorece que se proponga una definición intermedia aplicada a las necesidades del trabajo, pudiendo establecerse como el conjunto de desplazamientos cotidianos y convencionales de personas, grupos o cosas.

En el contexto presente la movilidad juega un papel fundamental en las vidas de las personas, sobre todo en el caso concreto de los estudiantes que diariamente se desplazan hasta sus centros de estudio. Sin embargo, las pautas de movilidad han sufrido notables cambios en las últimas décadas, sobre todo entre las personas jóvenes, que cada vez poseen un menor número de permisos de conducir y vehículos propios que generaciones anteriores (Nash & Mitra, 2019). El aumento continuado de los precios para adquirirlos (Chatterjee et al., 2018), ligado a una progresiva mejora del transporte público, ha llevado a un mayor uso de dichas alternativas, las cuales son cada vez más eficientes, asequibles y sostenibles.

La educación es uno de los servicios básicos que crea mayores necesidades de movimiento en etapas superiores (Gutiérrez & Jaraíz, 2018). El desplazamiento obligado de un número cada vez mayor de estudiantes hasta su centro de estudio es uno de los procesos que mayor coste representa y que por su rutina frecuentemente pasan inadvertidos, entre otros, de tipo económico, social y ambiental. En las últimas décadas ha crecido la oferta y el acceso a los grados universitarios (Bilbao & Fernández, 2004), dando lugar a que en España se registre por primera vez más personas con estudios superiores que con Enseñanza Secundaria (RTVE, 2021). Por ende, también ha crecido el número de universitarios que necesitan desplazarse casi diariamente a su centro de estudio y que generalmente presentan unos rasgos culturales y económicos similares (Maciejewska et al., 2020).

En el caso de las grandes ciudades con universidades emplazadas en ámbitos alejados de los núcleos urbanos principales, la movilidad hasta estos campus representa un gran número de los desplazamientos cotidianos totales. Esta circunstancia provoca que actualmente la consolidación de la descentralización de las ciudades haya llevado a un notable aumento de la movilidad y uso del coche (Banister, 2008).

La ubicación del campus de la Universidad Pablo de Olavide (UPO), junto al río Guadaíra y la carretera Sevilla-Utrera, alejada de la ciudad de Sevilla, y emplazada entre tres municipios (Dos Hermanas, Alcalá de Guadaíra y Sevilla) (Pavón & Quiles, 2005), favorece en muchas ocasiones el empleo del vehículo propio, en detrimento de otros medios más eficientes y sostenibles. No obstante, como señalan algunos autores la mejora de los sistemas de transportes públicos es fundamental para la creación de una alternativa eficiente, asequible y sostenible, que reduzca la movilidad en coche (Hensher, 1998). El desarrollo de la red de metro en la ciudad de Sevilla, y el hecho de que la Universidad cuente con una parada en su campus, favorece notablemente el uso de este medio de transporte.

Un elemento clave de la movilidad actual es la sostenibilidad, ya que el sector transporte representa el 28 % del consumo de energía de España. Por otro lado, las emisiones de CO₂ producidas por el sector son algunas de las mayores causas del efecto invernadero y del cambio climático (Barriada, 1999), llegando a representar el 25 % de emisiones totales de gases de efecto invernadero en España (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2022).

Una de las premisas fundamentales de la movilidad sostenible es la creación de un sistema integrado e intermodal entre los distintos medios de transporte que lo conforman. El fin de esta política orientada hacia la sostenibilidad es conseguir un cambio modal en los desplazamientos, otorgando prioridad a la utilización de sistemas de movilidad y transporte más eficientes, entre ellos se incluyen los colectivos públicos tales como autobús, metro, tren, tranvía, etc. Además de la creación de un sistema intermodal e interconectado, la utilización del vehículo privado compartido y modelos de desplazamiento alternativos son prioridades de este modelo, como la bicicleta y la movilidad a pie.

La Unión Europea y España se enfrentan al inevitable reto de impulsar la movilidad sostenible, a la vez que de reducir el volumen de tráfico rodado motorizado. Para ello es imperativo la planificación, desarrollo y mejora del transporte público (Ministerio de Fomento, 2019). Este estudio se centra en el análisis de las conductas de movilidad de los estudiantes del Grado de Geografía e Historia y sus dobles grados, de la Universidad Pablo de Olavide. También se analizará el impacto real que ha tenido la medida de bonificación de transporte sobre la movilidad de los estudiantes en el caso concreto del universo seleccionado. La Universidad Pablo de Olavide ofrece múltiples opciones de transporte para desplazarse: metro, autobús urbano, autobús interurbano, bicicleta, itinerarios peatonales y todo tipo de vehículos privados. En este estudio se indaga en aquellos aspectos más relevantes, relacionados con la movilidad, principalmente cotidiana, del grupo seleccionado, donde se tendrá muy en cuenta la sostenibilidad, el coste y el medio que emplean para desplazarse a las instalaciones de la Universidad. Para el análisis de las conductas de movilidad se ha realizado un sondeo (recogido en el anexo), cuyos resultados posibilitan la obtención de una serie de conclusiones sobre la movilidad de los estudiantes y los diferentes factores que influyen en la elección del medio de transporte.

Para finalizar es importante señalar como a pesar de no existir estudios previos recientes en el caso de la Universidad Pablo de Olavide, hay trabajos similares realizados para otras universidades donde se analiza la movilidad de diferentes campus universitarios, como es el caso del “Plan de movilidad sostenible de la Universidad de Extremadura. Diagnóstico de la movilidad en los Campus” de la Universidad de Extremadura (Jaraíz et al., 2018) o “La movilidad en el campus de Vila-Seca de la URV: Propuestas para una movilidad más sostenible” (Saladié & Jurado, 2015) publicado en esta misma revista.

1.1. Objetivos e hipótesis de partida

El trabajo que se presenta tiene como objetivo principal el estudio de las conductas de movilidad de los estudiantes del Grado en Geografía e Historia y sus dobles Grados de la Universidad Pablo de Olavide, una muestra reducida del global de estudiantes que se desplazan diariamente a sus instalaciones, pero que permite un primer acercamiento a las pautas de movilidad que presentan los estudiantes del campus.

Para ello, se analiza, entre otros, el medio de transporte empleado, el tipo de billete adquirido, porcentaje de uso del transporte público sobre el vehículo privado, junto con el grado de sostenibilidad y eficiencia. Los datos se obtienen a través de una encuesta anónima a los estudiantes del Grado en Geografía e Historia y sus dobles Grados de la Universidad Pablo de Olavide en el curso 2022-2023. Para alcanzar este objetivo principal se establecen los siguientes secundarios:

- Conocer el uso de los medios transportes públicos y de aquellos no contaminantes.
- Examinar el grado de sostenibilidad de las conductas de movilidad del grupo de muestra.
- Analizar el impacto que han tenido las medidas de bonificación de los medios de transporte público en las conductas de movilidad del grupo estudiado.

La hipótesis principal que se quiere demostrar es como la implantación de medidas para fomentar el uso del transporte público incide positivamente en las conductas de movilidad, sobre todo cuando se realiza un trayecto que suele estar frecuentado por población joven con capacidad de adaptarse fácilmente a los cambios. Por tanto, una oferta ajustada a sus necesidades puede favorecer un mayor uso de los medios de transporte públicos en detrimento del vehículo privado.

1.2. Estado de la cuestión

En la actualidad es innegable que las ciudades y los entornos metropolitanos requieren modelos de movilidad inteligentes que aseguren la accesibilidad universal y reduzcan las desigualdades. Para ello, es esencial dotarlos de sistemas de transporte que favorezcan el desarrollo de un entorno eficiente, sostenible y accesible (Mataix-González, 2010). El fin de esta política orientada hacia la sostenibilidad es conseguir un cambio modal en los desplazamientos otorgando mayor importancia a los medios menos contaminantes.

En el sector transportes es fundamental el desarrollo de una movilidad más eficiente ambientalmente, ya que dentro de la UE ha incrementado sus emisiones de CO₂ entre los años 1990 y 2018, concretamente un 21 %, mientras que el resto de los sectores han reducido sus emisiones (Gallo & Marinelli, 2020). La Unión Europea y España se enfrentan al inevitable reto de impulsar la movilidad sostenible, junto a la reducción del volumen de tráfico privado motorizado. Para ello, es fundamental la planificación, desarrollo y mejora del transporte público (Ministerio de Fomento, 2019).

Según el Consejo de Transporte de la Unión Europea, un sistema de transporte sostenible no tiene como único fin ser sostenible, del mismo modo debe responder a una serie de necesidades básicas en torno a la accesibilidad, seguridad, eficiencia e igualdad (Ministerio de Fomento, 2019). Los sistemas de transporte deben convertirse en un vector de innovación para el entorno urbano, a través de la incorporación de las más avanzadas tecnologías que fomenten la eficiencia y la sostenibilidad. La innovación tecnológica es una herramienta fundamental para implementar estrategias que promuevan una movilidad urbana sostenible. Según la Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030 (2021), la política de movilidad urbana sostenible tiene como finalidad “garantizar un equilibrio a largo plazo entre las necesidades de movilidad y el medio ambiente” para los ciudadanos.

Un ejemplo de nuevas formas de comportamiento que favorecen una movilidad más sostenible es el *Carpooling* o compartir vehículo, ya que propicia que sean compartidos los gastos de combustible, reduce el número de vehículos en circulación y, por ende, aminora la contaminación (Esteve, 2021). El *Carpooling* no es reciente, aunque las nuevas tecnologías de la información y comunicación han impulsado estos hábitos. En 2021 la Universidad Pablo de Olavide a través de la APP “Hoopcarpool” promovió que los estudiantes y trabajadores pudieran compartir vehículo para desplazarse hasta la Universidad (Benítez, 2021). En las políticas de las universidades juega un papel muy importante favorecer una movilidad sostenible, ya que una gran cantidad de desplazamientos cotidianos son generados por los mismos centros.

La Comunidad Autónoma de Andalucía es uno de los espacios con mayor concentración de áreas metropolitanas de toda España, donde destacan las de Sevilla y Málaga, ya que superan el millón de habitantes (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2022b). El crecimiento de las aglomeraciones urbanas ha conllevado la “deslocalización” de algunos equipamientos, tales como las universidades que tradicionalmente se ubicaban en el núcleo urbano principal. Sin embargo, a partir de los años 70 del siglo pasado las dotaciones universitarias suscitaron la oportunidad de emplazarse dentro de los nuevos entornos metropolitanos, lo que favoreció que en los años 90 un gran número de universidades españolas tuvieran sus campus en ámbitos metropolitanos/periurbanos (Vahí et al., 2015).

La Ley 2/2003 de Ordenación de los Transportes Urbanos y Metropolitanos de Viajeros en Andalucía fomenta el uso del transporte público y la intermodalidad en los espacios metropolitanos. Tiene por finalidad combatir los problemas ambientales, urbanísticos y sociales derivados de la relación entre los actuales patrones de movilidad y el sucesivo proceso de metropolitanización, en las que hay un uso mayoritario del transporte privado. Además, en las últimas décadas se han creado consorcios de transporte para las diferentes áreas metropolitanas de Andalucía (Valenzuela et al., 2011), lo que ha favorecido que existan numerosas opciones de transporte que conectan los núcleos de las áreas metropolitanas con las urbes principales. En el caso de Sevilla, desde su área metropolitana se pueden acceder a las redes de cercanías, metro y autobuses urbanos e interurbanos.

Existen diversos estudios que analizan como afrontar el desarrollo de un sistema eficiente entre las zonas urbanas de un área metropolitana. Según Banister (2008) existen cuatro tipos de acciones para fomentar la movilidad sostenible, donde teniendo en cuenta esta serie de acciones, se permite desarrollar estrategias para afrontar el reto de la movilidad sostenible en los ámbitos metropolitanos.

1. Hacer uso de la tecnología, fomentando inversiones en I+D+I dentro del sector transportes, y favorecer el empleo de vehículos híbridos, con consumo más eficiente.
2. Aumentar el precio de las gasolinas a la vez que se reduce el del transporte público.
3. Planificar el espacio urbano de forma integrada para reducir la distancia de los viajes.
4. Crear un debate en la sociedad, a la vez que se implica en el proceso de transformación para crear conciencia del cambio.

En el caso concreto del municipio de Sevilla, la oferta y las infraestructuras de los medios de transporte públicos favorecen que sea la séptima la ciudad donde la movilidad es más sostenible en España (Ameneiro, 2021). La implantación de un sistema de transporte multimodal favorece la lucha contra el cambio climático y sus consecuencias directas en las vidas de las personas, lo que ha propiciado una mayor preocupación social y, en consecuencia, la demanda de medidas que permitan frenarlo (Lara, 2007).

La preocupación patente para hacer más respetuosos con el medio los desplazamientos han favorecido que desde el Gobierno de España se haya impulsado un anteproyecto de Ley de Movilidad Sostenible, que persigue dar respuesta a los Objetivos de Desarrollo Sostenible y a los retos ambientales y urbanos a los que se enfrenta el país. La Ley busca promover un transporte público urbano basado en criterios estables y proporcionales, impulsando la innovación, sostenibilidad y digitalización.

La Agenda Urbana Española, tomada en consideración por el Consejo de Ministros el 22 de febrero de 2019, se concibe como un documento estratégico, sin carácter normativo, como marco de referencia para lograr la sostenibilidad de las políticas urbanas en 2030. En el documento se plantean numerosas actuaciones enfocadas a la sostenibilidad del transporte urbano persiguiendo, entre otros, objetivos crear una movilidad urbana mixta que reduzca distancias, promover la conectividad urbana y el acceso universal, favorecer cadenas metropolitanas y su intermodalidad, y fomentar la movilidad ciclista.

A nivel regional el Plan de Infraestructuras de Transporte y Movilidad de Andalucía (PITMA 2030) de la Junta de Andalucía busca desarrollar políticas en materia de infraestructuras y sistemas de transporte con el objetivo de crear un modelo de movilidad sostenible en Andalucía. Para ello, se proponen una serie de objetivos a cumplir, como seguir avanzando hacia una movilidad regional sostenible, mejorar las capacidades de I+D+I, incorporar nuevas tecnologías en materia de movilidad y transporte, mejorar los servicios de transporte a través de la transformación digital, promover medidas que favorezcan la eficiencia energética y la actuación frente al cambio climático, y desarrollar una red de transporte sostenible de personas y bienes que se adecue a la demanda (Consejería de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda, 2019).

Para finalizar, a nivel local el Plan de Movilidad Urbana Sostenible del Ayuntamiento de Sevilla tiene por finalidad reducir las emisiones en Sevilla en un 55 %, la integración del modelo de movilidad sostenible en el área metropolitana, que $\frac{2}{3}$ partes de los desplazamientos se realicen de forma sostenible, y que el 75 % del transporte público sea en vehículos de 0 emisiones. Para conseguir estos objetivos los grandes focos generadores de movilidad deben adecuarse para potenciar desplazamientos más sostenibles, promoviendo la elaboración de planes de movilidad sostenible que ordenen y canalicen estos desplazamientos.

2. Metodología

2.1. Consideraciones metodológicas

El estudio se ha basado, en un primer momento, en una recopilación de documentación sobre las características de los desplazamientos que se realizan en ámbitos universitarios, con el fin de conocer estudios precedentes que hayan tenido en cuenta una temática similar. Asimismo, se ha complementado con una búsqueda bibliográfica de textos que ayuden a profundizar en los criterios que permiten establecer una movilidad sostenible en espacios urbanos e interurbanos.

Posteriormente, una vez realizada esta revisión bibliográfica, se ha elaborado un sondeo que se ha pasado a los estudiantes bajo la premisa de alcanzar la máxima población posible y que se encuentra recogido en el anexo de este artículo. Para ello, se ha decidido realizar encuestas *in situ*, en las aulas habituales y en asignaturas obligatorias de los diferentes cursos del Grado de Geografía e Historia y sus dobles grados con Relaciones Internacionales y Ciencias Ambientales, lo que permite diversificar el alumnado que responde el cuestionario al ser estudios donde intervienen diferentes facultades del campus. La encuesta se elabora a través de la herramienta web *Google Forms*, en concreto, el creador de formularios. Con la finalidad de llegar al máximo número de encuestados, se transforma el enlace del sondeo en un código QR, a través de la herramienta web ME-QR. El formato QR es muy accesible para la población joven, gracias a la comodidad que supone transformar un enlace web a este formato que fácilmente es capturado por un smartphone, no siendo necesario su envío por email.

La encuesta fue realizada en la primera semana del segundo cuatrimestre, momento en el que se ha estimado mayor presencialidad en las aulas, entre finales de enero y principio de febrero, y en consecuencia una posible mayor participación. No obstante, a pesar de haberlo realizado durante este periodo de mayor presencialidad, no se ha alcanzado a toda la población. Esta circunstancia puede deberse al absentismo escolar, un problema frecuente en este tipo de enseñanzas superiores, tal y como señala Crespo et al. (2012) “Un 36 % de estudiantes señalan no asistir entre un 11 % y 20 % de las clases; mientras que un 22 % de alumnos declaran faltar a clase entre un 21 % y 40 %”. En el estudio realizado por Saladié & Jurado (2015) se alcanzó un 58,6 % de la población total siguiendo un proceso metodológico similar.

Teniendo en cuenta este inconveniente, se ha optado por compartir el enlace de la encuesta a través de los diferentes grupos de WhatsApp que tienen los estudiantes del Grado, para que aquellos estudiantes que no asisten habitualmente tuvieran la oportunidad de responder el cuestionario. En todo momento se ha mantenido el anonimato, aunque se han tomado las medidas oportunas para que un mismo individuo no responda el cuestionario más de una vez, como a partir del bloqueo de emails para que no pueda ser contestado varias veces el cuestionario.

El sondeo se ha realizado a partir de un muestreo probabilístico, concretamente, uno aleatorio simple, ya que todos los individuos tienen la misma posibilidad de ser elegidos. El tamaño muestral logrado a través de la encuesta es de 125 individuos de los 257 alumnos matriculados, es decir, un 49 %. Hay que tener en cuenta que el error muestral máximo de poblaciones finitas para un nivel de confianza del 95 % se sitúa en un 6,23 %, mientras que para un nivel de confianza del 99 % se sitúa en un 8,21 %, según trabajos anteriores como el de Dawood & Rahmat (2015) y Forsyth et al. (2012) son aceptables aquellos comprendidos entre un 5 y un 10 %. Estas cifras son una muestra de los 10.261 estudiantes matriculados durante el curso 2022-2023 (Universidad Pablo de Olavide, 2023), lo que supondría para un nivel de confianza del 95 % un error máximo de 8,71 %.

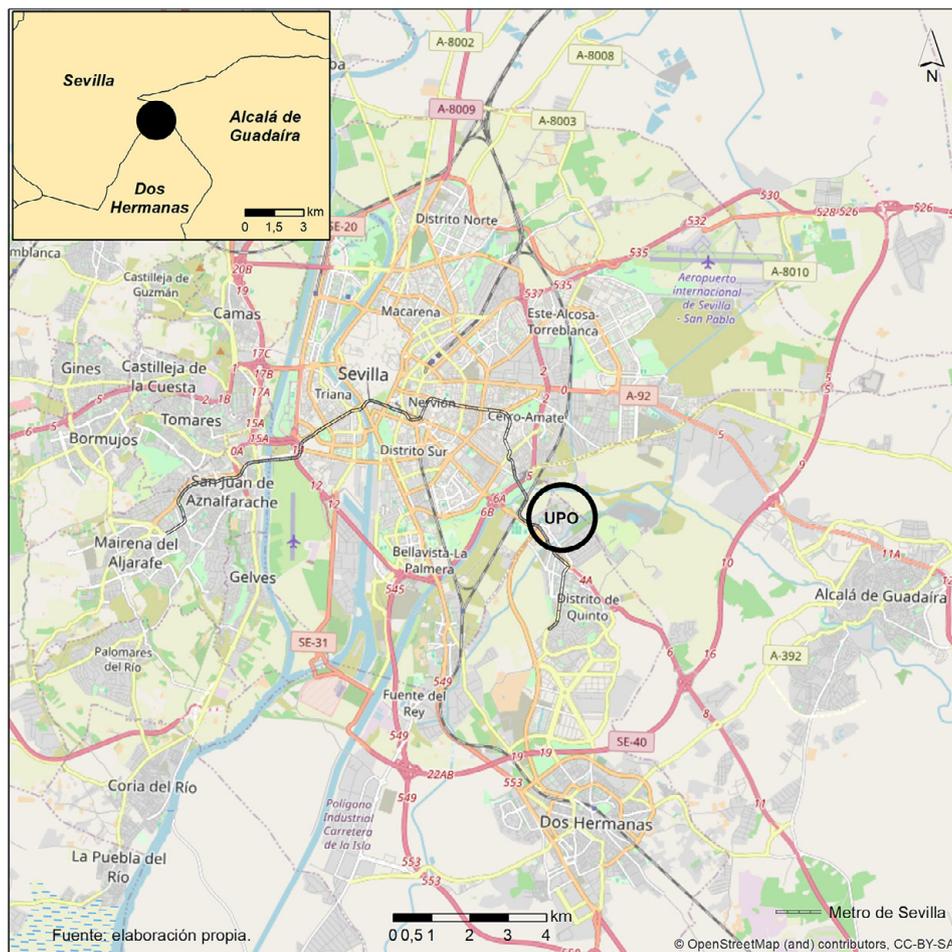
Con la finalidad de que los estudiantes completasen en su totalidad la encuesta, se elaboró un cuestionario breve, con 21 preguntas de respuesta múltiple, ordenadas en tres ámbitos:

- Datos básicos sobre la población: edad, sexo, lugar de procedencia y lugar de residencia durante el año académico.
- Cuestiones dirigidas a averiguar las conductas de movilidad habituales, tanto desde y hacia la universidad, como en el día a día.
- Cuestiones encaminadas a estudiar el impacto de la medida de bonificación de los medios transportes como: nivel de conocimiento, valoración e impacto que ha tenido sobre las conductas de movilidad.

2.2. Contexto de la Universidad Pablo de Olavide

La Universidad Pablo de Olavide se sitúa en el borde meridional del municipio de Sevilla. Se trata de un campus situado dentro de los tres municipios con mayor población de la provincia, como son Sevilla, Dos Hermanas y Alcalá de Guadaíra. La UPO se emplaza aproximadamente a 10 km del centro de la ciudad de Sevilla, a 13 km de Dos Hermanas y a 15 km de Alcalá de Guadaíra (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localización del campus de la Universidad Pablo de Olavide (UPO) en el contexto metropolitano de Sevilla

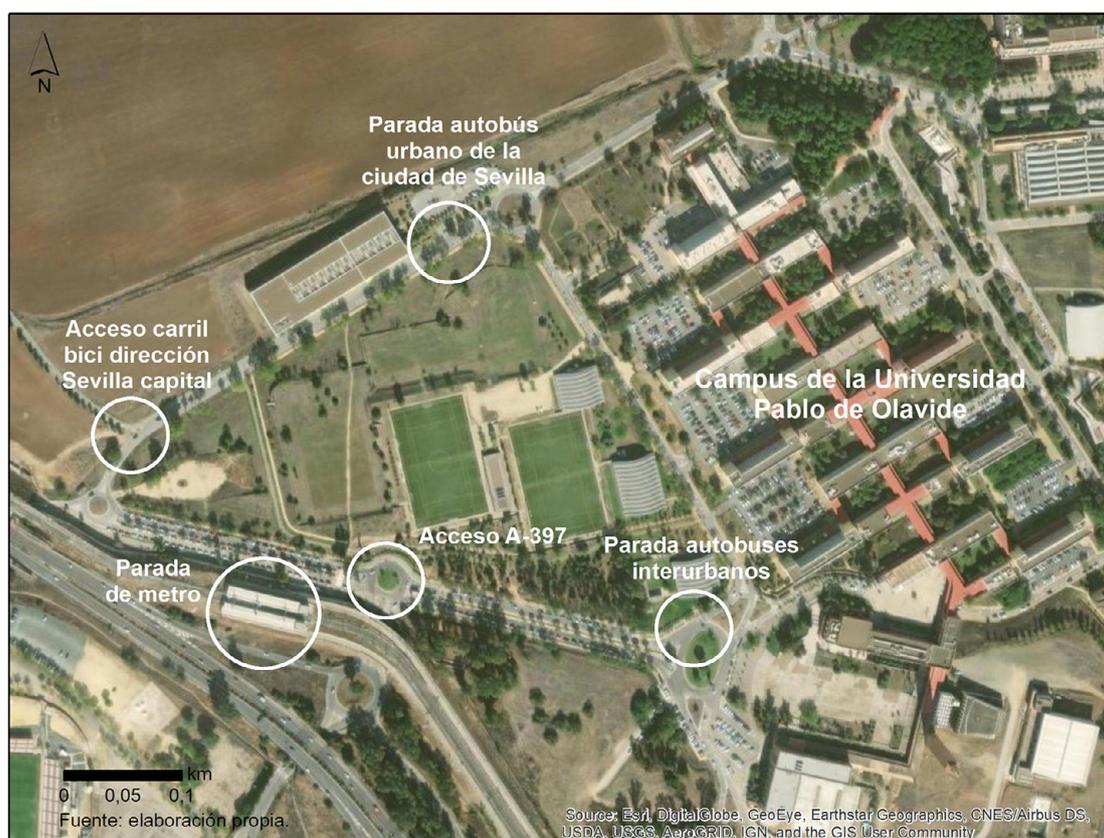


Fuente: OpenStreetMap. Elaboración propia

A pesar de su localización, dispone de varias opciones de transporte público, entre las que destaca la parada del Metro de Sevilla, situada en la parte exterior del campus (Figura 2), aunque deja algunas zonas de la capital sin conexión directa, lo que propicia la necesidad de varios trasbordos entre medios de transporte públicos para poder llegar a la Universidad. El metro conecta, entre otras, con la red de cercanías de Sevilla a través del intercambiador de San Bernardo. Éste permite trasbordos rápidos y sencillos con las líneas C1, C4 y C5 del sistema de cercanías, así como con los servicios de Media Distancia a Cádiz y Málaga. La Universidad Pablo de Olavide también dispone de varias paradas de autobuses tanto urbanos (Tussam, Sevilla), como interurbanos (SAMAR, en el caso de Dos Hermanas, y CASAL, en el caso de Alcalá de Guadaíra), aunque con otras localidades cercanas al campus del ámbito metropolitano no presenta medios de transporte directos, como con Utrera. Asimismo, el campus se encuentra conectado con la red de carriles bici de la ciudad de Sevilla (Figura 2).

Esta oferta de medios de transporte puede favorecer una intermodalidad que propicie el uso de aquellos medios menos contaminantes, apoyando el cumplimiento de algunos de los objetivos de documentos como el Plan de Infraestructuras de Transporte y Movilidad de Andalucía (PITMA 2030), donde se indica la necesidad de “Promover la movilidad urbana y metropolitana multimodal sostenible”. No obstante, en ocasiones propicia que la población estudiantil se acabe focalizando en los núcleos de población que tiene conexiones directas con el campus.

Figura 2. Mapa de alternativas de transporte cercanas al campus de la Universidad Pablo de Olavide (UPO)



Fuente: ESRI, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community.
Elaboración propia

3. Resultados

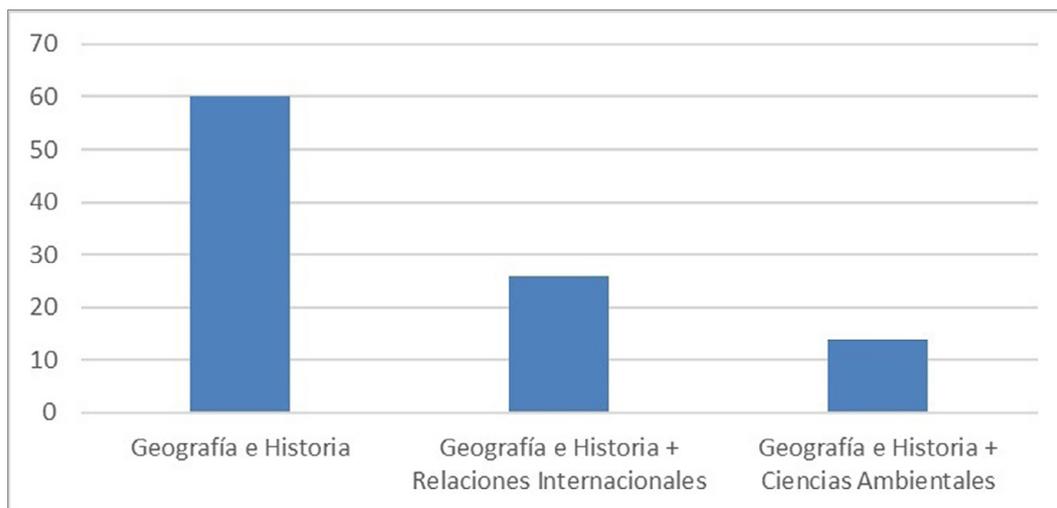
3.1 Características del alumnado encuestado

La distribución por sexo del conjunto de la población que ha participado en el sondeo presenta valores relativamente equilibrados, aunque hay una mayor presencia del grupo masculino, ya que un 60 % son hombres, un 37,6 % mujeres, 1,6 % no binario y un 0,8 % se abstiene de indicarlo. La media de edad es de 20 años, tratándose de una población relativamente joven. En cuanto a la situación laboral, tres de cada cuatro encuestados es estudiante a tiempo completo, mientras que un 11,2 % compagina estudios con un empleo

a media jornada, y un 2,4 % son estudiantes y empleados a jornada completa. Por tanto, en su mayoría se tratan de estudiantes que dependen económicamente de becas de estudio o ayudas familiares para realizar sus desplazamientos al campus.

En cuanto a la distribución de la muestra por grados, un 60 % estudia el Grado en Geografía e Historia, un 26 % el Grado en Geografía e Historia y Relaciones Internacionales, un 14 % el Grado en Geografía e Historia y Ciencias Ambientales. Cifras de participación similares a las del total de alumnos matriculados en los grados: 58 % Geografía e Historia, 26,5 % Geografía e Historia y Relaciones Internacionales y 15 % Geografía e Historia y Ciencias Ambientales (Figura 3).

Figura 3. Porcentaje de estudiantes matriculados en el Grado en Geografía e Historia y sus dobles Grados en la Universidad Pablo de Olavide en el curso 2022-2023



Fuente: Información proporcionada por la secretaría de la Facultad de Humanidades de la Universidad Pablo de Olavide

La procedencia del grupo encuestado es heterogénea (Tabla 1), aunque una gran mayoría es originaria del municipio y de la provincia de Sevilla. Esta circunstancia propicia que un 85,6 % de los individuos provengan de Andalucía, un 65,6 % de la provincia de Sevilla y un 38,7 % del municipio de Sevilla. Por el contrario, un 34,4 % de los estudiantes encuestados proceden de fuera de la provincia de Sevilla, un 18,4 % de otras provincias de Andalucía y un 13,6 % de otras comunidades autónomas.

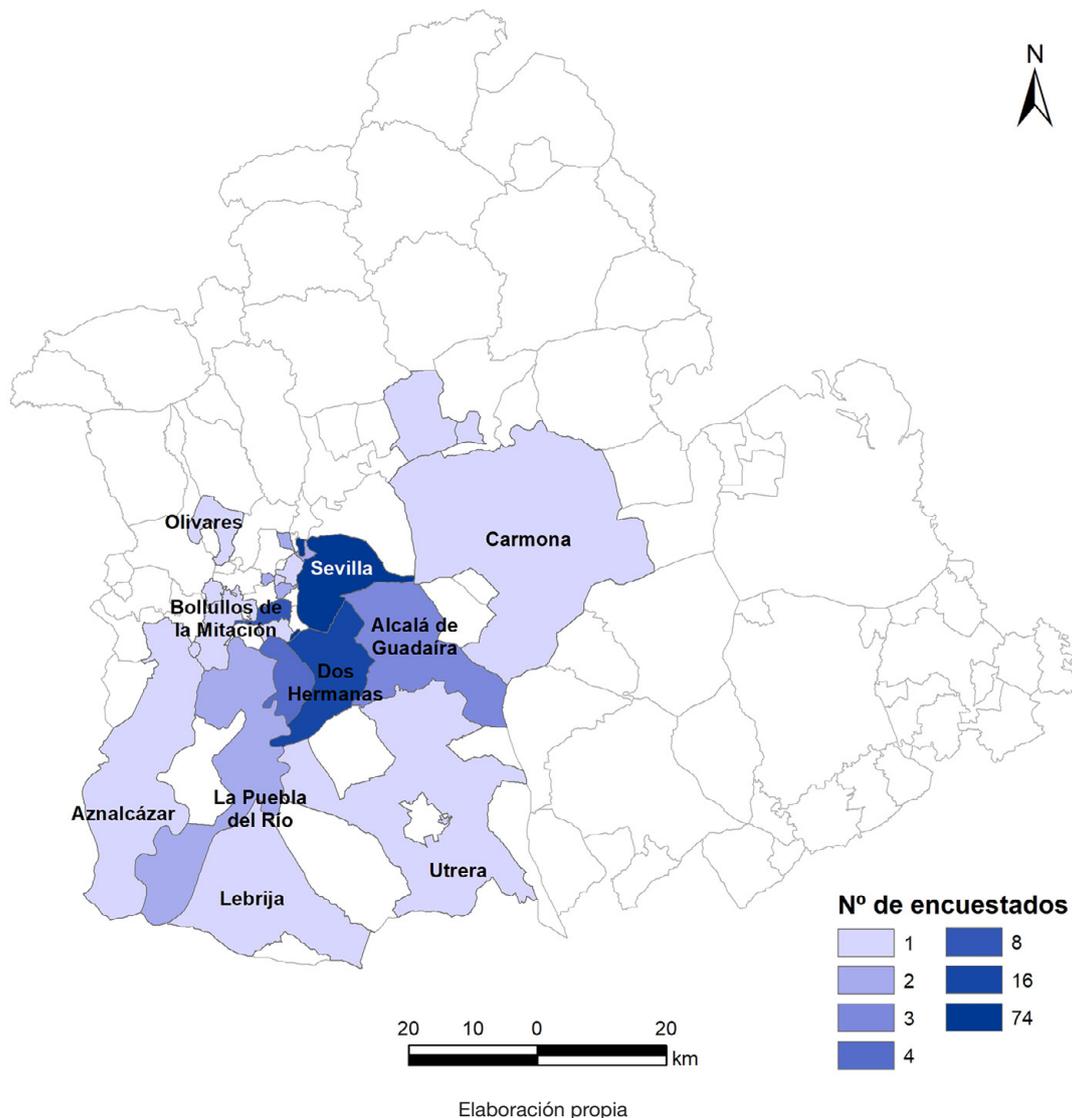
Tabla 1. Distribución de los estudiantes encuestados según procedencia por CCAA, provincia y país

Procedencia	Porcentaje
Andalucía	85,6 %
Provincia de Sevilla	65,6 %
Provincia de Cádiz	8 %
Provincia de Huelva	4,8 %
Provincia de Málaga	2,4 %
Provincia de Córdoba	1,6 %
Provincia de Almería	0,8 %
Provincia de Granada	0,8 %
Extremadura	6,4 %
Comunidad Valenciana	2,4 %
Canarias	2,4 %
Navarra	0,8 %
Galicia	0,8 %
Cantabria	0,8 %
Francia	0,8 %

Elaboración propia

Como se ha indicado anteriormente un 65,6 % del alumnado encuestado procede de la provincia de Sevilla, distribuida entre la ciudad de Sevilla y otros 24 municipios, como se puede observar en la figura 4. Su distribución es relativamente equilibrada, residiendo cerca del 60 % en la ciudad de Sevilla, mientras que algo más del 40 % vive en otras localidades. Después de Sevilla, el municipio que aporta más alumnado al Grado es Dos Hermanas con un 20 %, de los cuales un 7,5 % vive en Montequinto, distrito cercano al campus de la UPO. Mairena del Aljarafe con un 10 % es el tercer municipio que cuenta con mayor representación. Estos valores muestran la importancia que tiene la línea actual de metro, ya que destacan municipios que tienen conexiones directas con el trazado actual. La necesidad de realizar transbordos, en el caso de realizar los desplazamientos en transportes públicos, para acceder al campus desde localidades más alejadas del campus, favorece que la mayoría de los estudiantes residan durante el curso en localidades cercanas al campus o conectadas a partir de servicios ferroviarios de cercanías o metro.

Figura 4. Mapa de la distribución de estudiantes según el municipio de residencia durante el curso académico 2022-2023



No obstante, un factor determinante a la hora de seleccionar el medio de transporte para acudir a la UPO es el lugar de residencia durante el curso académico. Destaca como un 73 % de los encuestados reside a menos de 9 km de la Universidad, mientras que dos de cada diez individuos residen entre 10 y 19 km, únicamente un 2 % reside entre 20 y 29 km y otro 2 % entre 30 y 39 km de la UPO (Tabla 2). Según Montull (2017) el tiempo de desplazamiento máximo que un estudiante universitario está dispuesto a realizar es de alrededor de 90 minutos. Los resultados obtenidos coinciden, ya que un 95 % de la población encuestada reside en un rango inferior a 20 km de la universidad, que equivalen aproximadamente a un máximo de 30 minutos en coche y 90-100 minutos en transporte público.

Tabla 2. Distribución de los estudiantes encuestados según la distancia desde la residencia habitual durante el curso académico hasta la Universidad Pablo de Olavide

Distancia	Alumnos	Porcentaje
0-9 km	92	73 %
10-19 km	27	22 %
20-29 km	3	2 %
30-39 km	3	2 %
+ 40 km	1	1 %

Elaboración propia

3.2. Movilidad de la población

Como se ha indicado anteriormente, la distancia al campus es un factor determinante a la hora de escoger un medio de transporte para desplazarse hasta las instalaciones de la Universidad. El trayecto que se debe realizar condiciona la oferta de medios de transporte, alternativas, intermodalidad y tiempo empleado. En consecuencia, un 79 % de los estudiantes residentes en un rango inferior a 19 km de la universidad realiza su desplazamiento en transporte público, siendo el metro de Sevilla el medio preferido, como se observa en la tabla 3.

Tabla 3. Desglose de la relación entre medio de transporte y distancia a la Universidad Pablo de Olavide

Distancia en km	Metro	Metro + Autobús	Metro + otros	Autobús	Bicicleta	Otros	Coche	Coche + Metro	Coche + Autobús
0-9	38	21		7	1	10	9	6	3
10-19	11	6				1		5	
20-29		1						2	
30-39		1	2						
+ 40			1						

Elaboración propia

Destaca como aproximadamente un 80 % de los individuos que residen a menos de 19 km utilizan siempre el transporte público para sus desplazamientos hasta el campus de la UPO. También, se observa que una parte importante son intermodales, siendo la opción más elegida la combinación de autobús y metro.

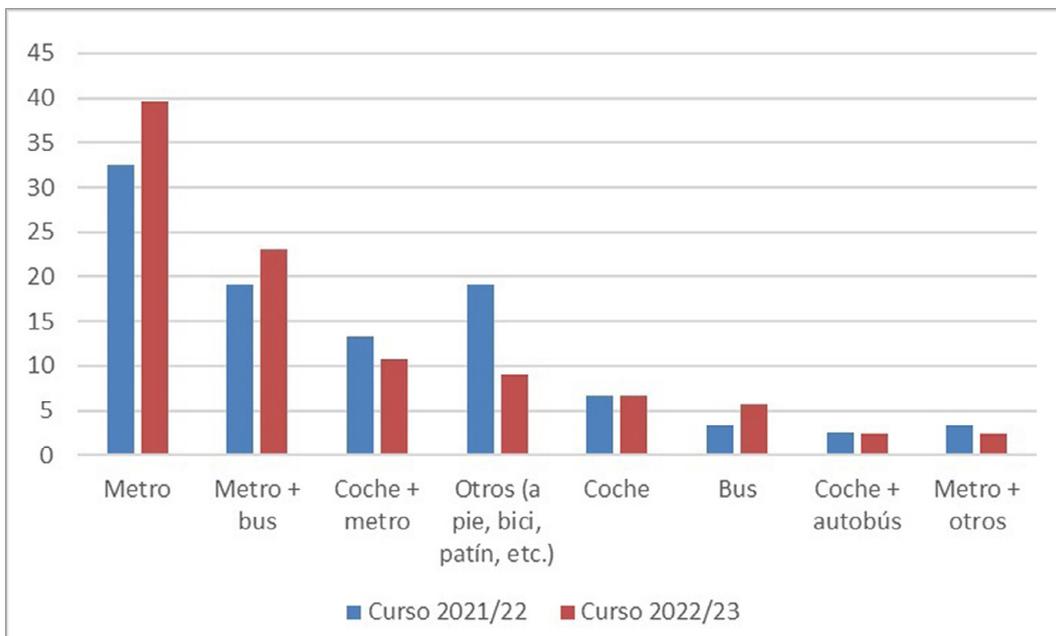
El metro es el medio más empleado para desplazarse al campus de la UPO, ya que aproximadamente un 40 % de los encuestados lo utilizan únicamente, mostrando la importancia que tiene el trazado actual y el impacto que podría propiciar la conformación de una red. Esta cifra escala a un 75 % si se tiene en cuenta su uso combinado con otros medios de transporte.

Los desplazamientos en autobús se encuentran bastante distanciados, empleado por un 31 % en uso mixto y exclusivamente en un 7 %. A estos valores le sigue el manejo del coche, con un 20 % en uso mixto y exclusivamente un 7,2 %. El carácter metropolitano de la UPO y distanciado de los núcleos urbanos explica que el grupo que conforman otros medios de transporte (bicicleta, patinete, monopatín, a pie, etc.) represente un 9,6 % del total (Figura 5).

No obstante, el grupo que mayor uso realizada del vehículo privado son los residentes en el rango comprendido entre 20 y 29 km de la Universidad, debido principalmente a las malas combinaciones que tiene el transporte público en esos núcleos. El desplazamiento en vehículo privado por sexo no presenta grandes diferencias, siendo hombres un 57 %, mujeres un 42 % y no binario un 1 %.

La comparación de los resultados obtenidos de los cursos 2021-2022 y 2022-2023 relevan el aumento del uso del transporte público, sobre todo en los ámbitos del metro, metro + bus y bus. Asimismo, los resultados coinciden directamente con la implementación de las medidas de bonificación sobre los precios del transporte público, además de la mejora de la situación con respecto a la pandemia mundial del Covid-19. La reducción de las tarifas, junto a la promoción de los transportes públicos son un factor determinante a la hora de que los estudiantes hayan elegido dichos medios de transporte.

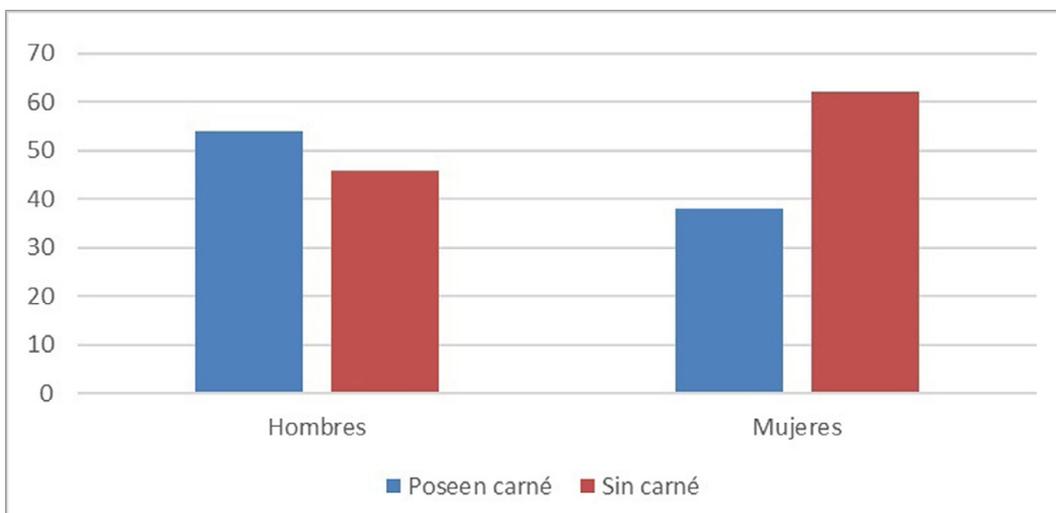
Figura 5. Representación porcentual de los medios de transporte utilizados por el grupo de muestra para desplazarse a la UPO en los cursos 2021-2022 y 2022-2023



Elaboración propia

El sondeo también muestra la relativamente baja posesión del permiso de conducir de las mujeres (39 %) con respecto a los hombres (53 %), mientras que a nivel global aproximadamente un 50 % disponen de carné de conducir (Figura 6). A pesar de que la mitad de los encuestados poseen carné de conducir, un 80 % realiza sus desplazamientos a la Universidad en transporte público o medios sostenibles.

Figura 6. Porcentaje de estudiantes encuestados con carné de conducir por sexo del Grado en Geografía e Historia y sus dobles grados de la Universidad Pablo de Olavide en el curso 2022-2023



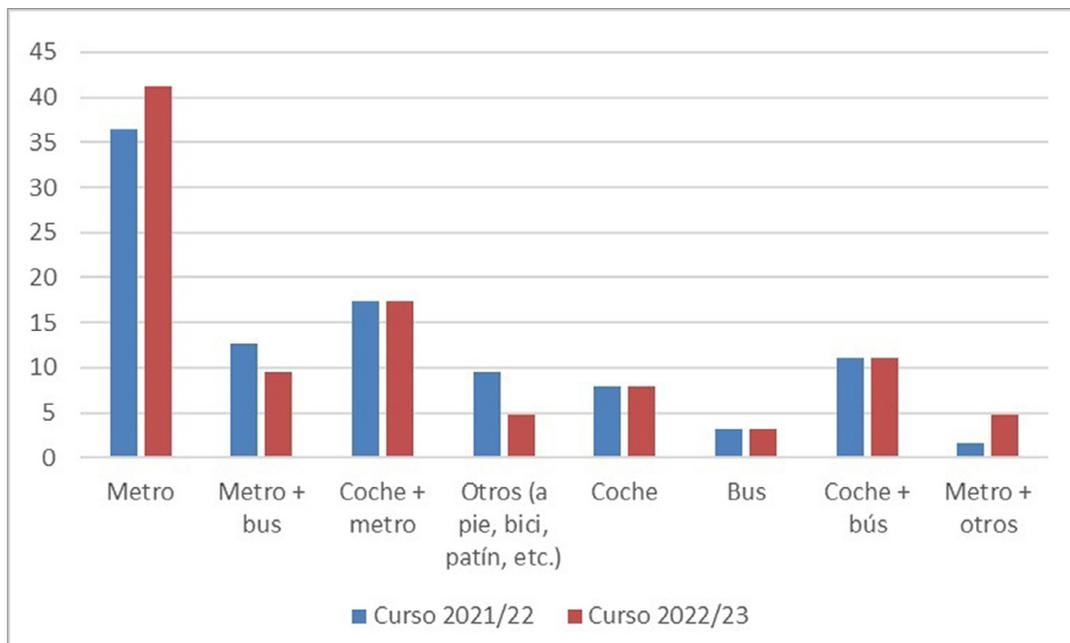
Elaboración propia

Relacionado con esta última cuestión, es importante conocer si la oferta pública de transporte puede favorecer el uso de estos medios, la intermodalidad u otros como son, entre otros, la bicicleta o el patinete. Como se puede ver en la figura 7, aunque la mitad de encuestados disponen de carné de conducir, sigue siendo mayoritario el uso del metro, no alcanzando el 10 % el uso único del automóvil. No obstante, un 25 % suele combinar el automóvil con otros medios de transporte, como el metro y el autobús.

La medida de bonificación implantada en el verano de 2022 ha tenido un impacto relativo entre el grupo de muestra, ya que nueve de cada diez encuestados afirman conocerlas. Las principales fuentes de información han sido, con un 30 % respectivamente, el boca a boca, las redes sociales y los canales de noticias/prensa.

No obstante, la reducción del precio del transporte público no ha influido en la elección del lugar de residencia durante el año académico, pues apenas el 10 % lo ha buscado teniendo en cuenta esta circunstancia.

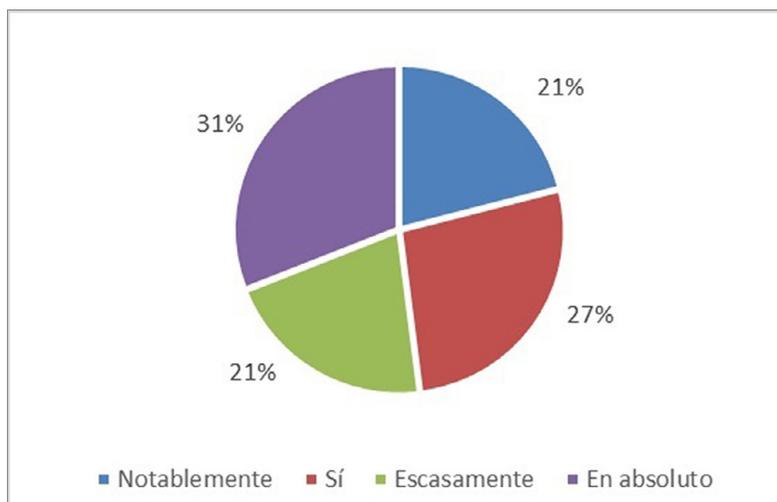
Figura 7. Representación porcentual de los medios de transporte utilizados por el grupo de muestra que tienen carné de conducir para desplazarse a la UPO en los cursos 2021-2022 y 2022-2023



Elaboración propia

Obtiene un relativo éxito el aumento del uso del transporte público, como consecuencia directa de la implementación de las medidas de bonificación del transporte público, ya que un 69 % lo usa más, concretamente, la mitad ha incrementado de forma considerable su utilización. Por el contrario, 3 de cada 10 individuos no ha modificado en absoluto sus conductas de movilidad (Figura 8). La valoración general de la medida es positiva, en una escala del 1 al 5 se obtiene una nota media de 3,9. En términos generales, prácticamente la totalidad del grupo conoce o ha oído hablar de las medidas, además de tener una valoración positiva.

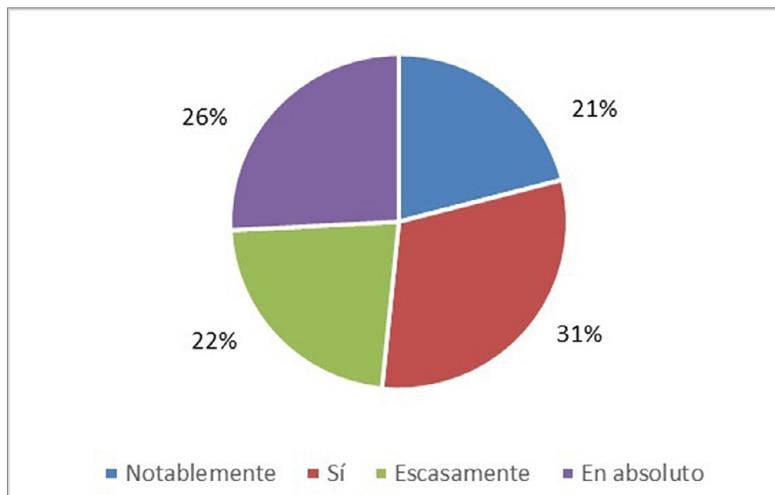
Figura 8. Cambios en las pautas de movilidad de los usuarios encuestados a raíz del abaratamiento del transporte público



Elaboración propia

Muestran cifras muy similares el análisis de los cambios que pueden haber favorecido las medidas de bonificación de los medios de transporte en aquellos posibles usuarios que tienen carné de conducir. Sin embargo, se ha reducido el número de encuestados en los que no ha tenido ningún impacto la medida, pasando de un 31 % a un 26 %, mientras que se ha incrementado en aquellos que han condicionado sus pautas de movilidad, de un 26 % a un 31 % (Figura 9).

Figura 9. Cambios en las pautas de movilidad de los usuarios encuestados que tienen carné de conducir a raíz del abaratamiento del transporte público



Elaboración propia

4. Discusión de resultados

Las universidades pueden influir notablemente en las conductas de movilidad de las personas (Millard-Ball et al., 2004), ya que juegan un papel fundamental en el diseño de la vida del campus y del municipio en el que se encuentra (Larkham, 2000). Estos centros son uno de los mayores generadores de desplazamientos y tráfico de la comunidad en la que se encuentran, además influyen notablemente en el tipo de movilidad que se crea dentro y alrededor de la misma (Delmelle & Cahill, 2012; Maciejewska et al., 2020).

La educación es uno de los servicios básicos que mayor necesidad de movimiento genera (Gutiérrez & Jaraíz, 2018). El desplazamiento obligado de un número cada vez mayor de estudiantes hasta un centro de estudio es uno de los procesos que mayor coste representa, que por su rutina frecuentemente pasan inadvertidos, entre otros, factores de tipo económico, social y ambiental. Bilbao y Fernández (2004) afirma que, en el caso de la Universidad del País Vasco, las facultades dentro del anillo urbano podrían aumentar el número de usuarios del transporte público si se incrementaran las frecuencias en los servicios de metro y se redujeran los precios.

El desplazamiento hasta las universidades cuya docencia es presencial es un proceso que los alumnos tienen que repetir varias veces por semana. El medio de transporte empleado para realizar estos desplazamientos puede ser diverso, en el caso de la Comunidad de Madrid, que cuenta con alrededor de 300.000 estudiantes universitarios, el 54 % de los alumnos realiza viajes en alguno de los servicios de transporte público (Luque, 2022). Asimismo, para acceder a la Universitat Autònoma de Barcelona un 59,7 % de los alumnos usa algunos de los servicios de transporte público, mientras que el 40 % lo hace en vehículo privado (Universitat Autònoma de Barcelona, 2015). Tendencia similar se sigue en el campus de la Universidad del País Vasco en San Sebastián donde el transporte en autobús es utilizado por la mitad de los estudiantes que acuden a sus instalaciones, donde se destaca la falta de alternativas o la comodidad (Gurrutxaga, et al., 2017). Por otro lado, se presentan resultados como los de la Universitat de les Illes Balears donde un 64,9 % hace uso del vehículo privado (Seguí & Ruiz, 2020) o los de la Universidad de Extremadura donde un 53 % usa el coche, un 26 % el autobús, un 19 % a pie y un 3 % la bicicleta y la moto. Existen diversos factores que pueden influir en estas cifras, como por ejemplo el hecho de que la universidad se componga de varios campus en diferentes partes de la ciudad, tal y como es el caso del campus Vila-Seca de la Universidad Rovira i Virgili, en el cual un 64,4 % realiza el desplazamiento hasta la universidad en coche, mientras que un 19,9 % en autobús y un 7,3 % en tren (Saladié & Jurado, 2015).

Existen otros estudios que profundizan en las características de la movilidad de los estudiantes en otros ámbitos, aunque sus métodos de análisis son diversos, enfocados al tipo de transporte empleado para llegar hasta el destino (Nash & Mitra, 2019), influencia del precio y la calidad del servicio sobre el número de usuarios (Bilbao & Fernández, 2004), sobre la mejora de la movilidad que se realiza hacia los centros de estudio (Saladié & Jurado, 2015), y planes de movilidad sostenible para universidades españolas (Gutiérrez & Jaraíz, 2018). Una gran parte de dichos trabajos son impulsados por las mismas universidades, con el fin de

estudiar el reparto modal e implementar medidas que potencien la sostenibilidad en los medios de transporte que se utilizan para acceder al campus. Teniendo en cuenta las diferentes características que presenta cada ciudad, se podría estimar que alrededor del 50 % de los estudiantes universitarios en España se mueven en un transporte sostenible, aunque el número varía en función de la ciudad y sus características.

Un factor que influye en el estudio realizado es la aprobación de la Resolución del 12 de agosto de 2022 de las medidas que han permitido reducir los precios sobre los títulos de viaje de un amplio abanico de medios de transportes públicos a nivel nacional, mientras que los estudios señalados no se encuentran influidos, ya que fueron realizados con anterioridad. Estas medidas se encuentran enfocadas en el fomento del transporte público a partir de su abaratamiento, como respuesta a los altos precios de la energía, combustibles y las consecuencias socioeconómicas derivadas de la pandemia del Covid-19 y de la Guerra de Ucrania. No obstante, el impacto que está generando en los cambios de hábito de la sociedad, como la universitaria, favorece que este primer estudio deba formar parte de otros posteriores, donde se analicen si se han mantenido a lo largo del tiempo, una vez que estas medidas no sean tan apreciables como las actuales.

El contexto metropolitano de la Universidad Pablo de Olavide es un espacio propicio, ya que genera una gran necesidad de desplazamientos que se deberían gestionar de forma adecuada para conseguir el desarrollo de una movilidad sostenible. Como se ha indicado en el apartado de resultados, la procedencia del grupo encuestado es diversa, aunque predomina aquella que proviene del municipio y de la provincia de Sevilla. Los valores registrados son intermedios si son comparados con los existentes en otras universidades, como en las gallegas donde los estudiantes procedentes de otras CCAA no superan el 5 % (Montero, 2019), mientras que en la Universidad de Granada asciende hasta un 48 % (Parra, 2019).

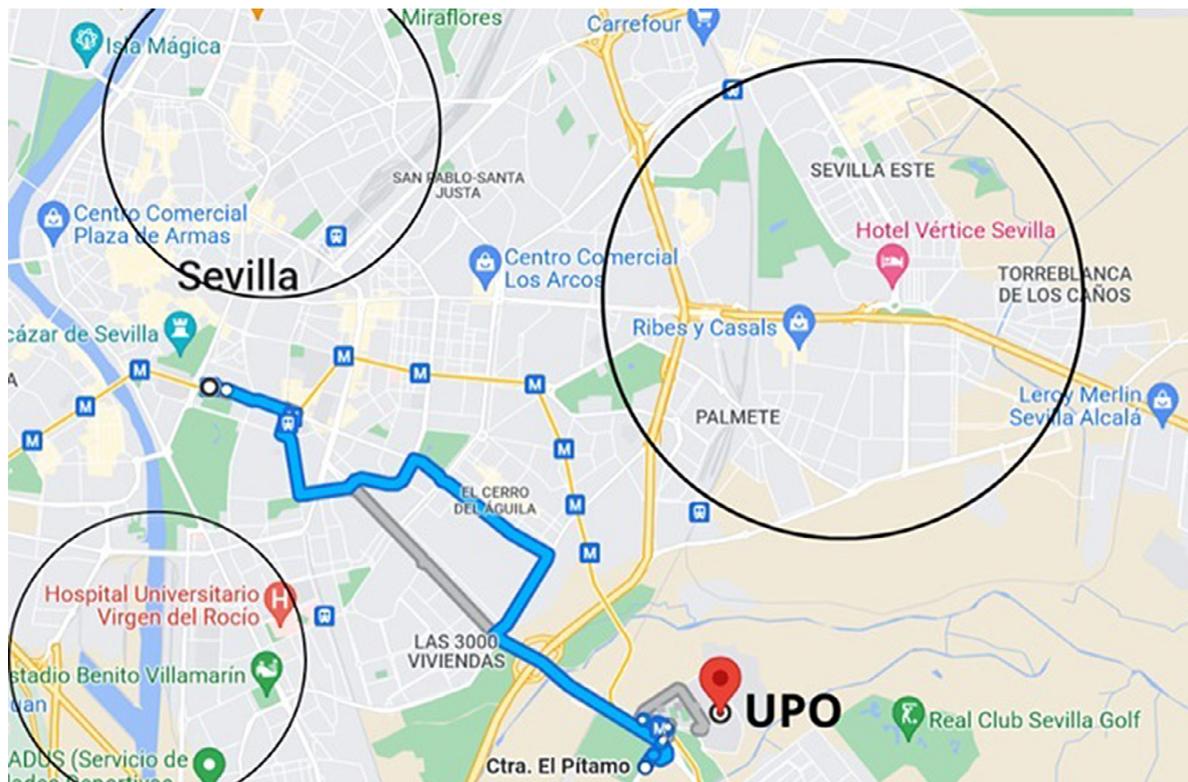
Asimismo, la localización del campus de la Universidad Pablo de Olavide permite que existan diferencias con respecto a otros de la Universidad de Sevilla, ambos localizados dentro del espacio metropolitano de Sevilla. En el caso del campus urbano del Rectorado y Ramón y Cajal, que tienen una localización céntrica dentro de la ciudad de Sevilla, destaca como los desplazamientos a pie suponen un 23 % y en bicicleta un 16 %, mientras que el uso del metro baja a un 9 % (Gavira et al., 2020), a pesar de tener en los alrededores tres paradas de metro (San Bernardo, Prado de San Sebastián y Puerta Jerez). Estas cifras permiten corroborar como en la elección de los medios de transporte influye la localización de las instalaciones, así como su oferta y su calidad. También influyen las actuales tendencias de decrecimiento de las licencias de conducir entre personas jóvenes (Morales, 2021), donde solamente la mitad de la población encuestada dispone de carné de conducir.

Los resultados obtenidos también permite contrastar el objetivo principal que se enfoca en conocer las conductas de movilidad del grupo de estudio en cuestión. Además, permite aproximarse a los patrones de movilidad de la población seleccionada y las posibles alteraciones que pueden sufrir con el tiempo. Gracias al análisis e interpretación de los datos obtenidos se exponen una serie de problemas y deficiencias en la red de transportes que incitan al uso del vehículo privado en lugar del transporte público, entre otros, se pueden destacar:

- Insuficientes conexiones y frecuencias entre municipios del área metropolitana y la red de metro (Figura 10). En el caso de los individuos que combinan el uso del coche con el metro, la gran mayoría provienen de municipios del borde exterior de Sevilla, estos carecen de conexiones de transporte público frecuentes con las cabeceras de metro lo que obliga a hacer uso del vehículo propio para llegar hasta las estaciones.
- Escasez de líneas de autobuses directas hasta la Universidad Pablo de Olavide. Destaca, como actualmente existe una única línea directa de Tussam (38/38^a, Prado-Pítamo-Olavide) entre todo el municipio de Sevilla y la UPO. Asimismo, la línea existente recorre escasos distritos de Sevilla, varios de los cuales son paralelos al Metro (que dispone de una conexión directa con la UPO). Prácticamente la totalidad de la zona norte y este de la ciudad de Sevilla está desconectada de forma directa de la UPO, siendo necesario trasbordos y por ende un mayor tiempo de viaje, lo que puede llevar al uso del vehículo propio.
- Paralización de las obras del tranvía entre Alcalá de Guadaíra y la Universidad Pablo de Olavide. El tranvía que conectará el centro de este municipio metropolitano con la UPO comenzó sus obras en 2010, sin embargo, a raíz del estallido de la crisis se paralizaron durante casi una década. Se trata de una infraestructura clave, no solo para la Universidad, sino para la vertebración del área metropolitana de Sevilla, por lo que es de gran importancia la culminación del proyecto como se indica en el PITMA 2030.

Estas deficiencias pueden haber influido en los resultados donde gran parte de los encuestados residen durante el curso en los núcleos que presentan servicios directos de transporte público. Cabe destacar como estos problemas de movilidad son recurrentes en otras universidades metropolitanas de Sevilla, como en los campus de la Universidad Loyola o la Universidad CEU Andalucía, si bien en estos casos no existe conexión con el metro de Sevilla y la oferta de buses metropolitanos es menor. En otros campus estudiados se constata un menor uso de los medios de transporte públicos, frente al privado que suele ser mayoritario, pudiendo estar relacionado con las características de los medios que llegan a esos centros universitarios. Por el contrario, en el área metropolitana de Sevilla la línea actual de metro tiene un impacto destacado, ya que canaliza una parte importante de la movilidad cotidiana que se genera.

Figura 10. Transportes directos a la Universidad Pablo de Olavide y zonas de Sevilla sin conexión directa



Fuente: Google Maps. Elaboración propia

5. Conclusiones

En el contexto actual, la movilidad es una de las políticas públicas que deben tenerse más en cuenta para la correcta gestión de los ámbitos metropolitanos. El acceso a bienes y servicios de primer nivel, como es la educación superior, debe tenerse presente, ya que estos centros generan un gran número de desplazamientos diarios. La sociedad actual busca reducir el impacto que generan los desplazamientos urbanos e interurbanos, ya que es uno de los sectores que emiten más gases de efecto invernadero (Barbero & Rodríguez, 2012; Lucas et al., 2015). Esta circunstancia ha propiciado la creación y fomento de modelos más sostenibles, eficaces y accesibles, así como su estudio y análisis en ciudades como Sevilla (Lucas et al., 2015).

En el trabajo se han analizado las conductas de movilidad cotidiana de una muestra compuesta por los estudiantes del Grado de Geografía e Historia y sus diferentes dobles grados de la Universidad Pablo de Olavide. Estos datos permiten conocer las dinámicas de transporte y sus principales características. En el sondeo realizado se revela que un 73 % de los individuos reside en un radio de 9 km del campus de la UPO, de los cuales, ocho de cada diez realizan su desplazamiento hasta la universidad en transporte público.

Se puede destacar que un 60 % de los encuestados combinan diferentes medios de transporte para llegar a la universidad, aunque cerca de la mitad utilizan algún medio de transporte privado. Ello se debe a las insuficientes frecuencias de autobuses lanzadera que conectan las cabeceras del metro con los municipios del área metropolitana y otros ámbitos más alejados. Uno de los resultados más relevante es el destacado uso del metro, a pesar de existir solamente una línea para todo el ámbito metropolitano de Sevilla, donde

tres de cada cuatro estudiantes encuestados usan este servicio para desplazarse hasta la Universidad, habiéndose incrementado su uso en esta estación en un 76,4 % en la comparativa anual entre 2021-2022 (Metro de Sevilla, 2023). Estos resultados refuerzan la necesidad de ampliar la red actual y favorecer mayor intermodalidad con otros medios de transportes (Ayuntamiento de Sevilla, 2021).

Junto al metro, el autobús es otro de los medios de transporte preferidos, se trata de transportes colectivos con una huella de carbono mucho menor que el vehículo propio y que también ha experimentado un importante crecimiento en la comparativa anual entre 2021-2022 con un incremento del 79,9 % (Consortio de Transporte Metropolitano del Área de Sevilla, 2022). No obstante, es importante señalar como uno de los factores que más han influido ha sido la relajación de las restricciones que fueron impuestas por la Covid-19, lo que ha incrementado la necesidad de desplazarse de la población estudiantil.

A pesar del éxito del metro y el autobús, sería necesario reforzar el sistema actual de cara a un sistema intermodal e interconectado eficiente para facilitar los flujos de personas desde los diferentes municipios del área metropolitana hasta los centros de estudio, para ello se propone adaptar el modelo de tráfico aéreo “hub to spoke” (Bryan & O’Kelly, 2002) al caso del área metropolitana de Sevilla. Este podría consistir en la llegada de autobuses lanzadera con un mayor número de frecuencias, procedentes de los diferentes municipios del área metropolitana a un hub de transportes (que en este caso serían las cabeceras de metro o la misma universidad) y desde éste realizar un trasbordo al metro para llegar al destino final. Este modelo ayudaría a reforzar la intermodalidad del sistema de transportes públicos de Sevilla y concretamente aquellas rutas a la universidad, así como a otros centros generadores de movilidad del ámbito metropolitano.

La hipótesis principal del estudio sostiene que la implantación de las medidas ha tenido un efecto positivo sobre las conductas de movilidad del grupo estudiado fomentando el uso del transporte público en detrimento del vehículo propio, lo que termina potenciando una movilidad más sostenible. A este respecto se puede contrastar la hipótesis con los resultados obtenidos. Éstos muestran que las conductas de movilidad se han visto modificadas parcialmente, en un 70 %, como consecuencia de las medidas de bonificación. No obstante, un 30 % no ha modificado su patrón de movilidad habitual, pudiendo relacionarse con la oferta actual de medios públicos. Estas cifras vienen a corroborar ciertos análisis de carácter periodístico donde se expone el impacto que están teniendo las medidas, como se indica en el artículo de “Las bonificaciones al transporte público impulsan la recuperación del sector” de la revista *ATUC: movilidad sostenible* (2022), que edita la Asociación de Transportes Públicos Urbanos y Metropolitanos. Sin embargo, actualmente no existen estudios en profundidad en ámbitos universitarios o en espacios donde se genera una movilidad cotidiana, donde se pueda cuantificar el impacto real de las medidas en los usuarios potenciales.

Se puede destacar, como la presente metodología se puede extrapolar a otros ámbitos y escenarios, siendo un elemento fundamental a tener en cuenta la situación y el contexto de cada territorio. En el caso de estudio que se presenta se analiza una muestra con unas características determinadas (edad, sexo, situación laboral, etc.), además de tratarse de un espacio concreto, la Universidad Pablo de Olavide, ubicada en el área metropolitana de la ciudad de Sevilla. La metodología empleada es perfectamente aplicable a otros espacios.

Para finalizar, se puede señalar como el ámbito de estudio también se puede llegar a comparar con otros, como el campus de la Universitat Autònoma de Barcelona ubicado en Sabadell, un contexto metropolitano similar al de la Universidad Pablo de Olavide, aunque se trata de la periferia del área metropolitana de Barcelona. El campus cuenta con una estación de Rodalies, diversos autobuses tanto urbanos como interurbanos, además de encontrarse junto a grandes infraestructuras viarias. Características muy similares a las que presenta la UPO. Por el contrario, los resultados obtenidos son llamativos; el 34,6 % en la Universitat Autònoma de Barcelona se desplaza en vehículo privado hasta la Universidad (Universitat Autònoma de Barcelona, 2020), mientras que en la UPO es un escaso 7,3 % (si se tiene en cuenta usos mixtos tales como coche + metro y coche + bus se mantiene en un 20 %), lo que viene a corroborar el mayor uso que se realiza de los medios de transportes públicos, posiblemente debido a las características descritas a lo largo del trabajo.

Anexos

Anexo 1. Encuesta sobre las conductas de movilidad de los estudiantes del Grado de Geografía e Historia y sus dobles Grado de la Universidad Pablo de Olavide

Sexo.

- Mujer
- Hombre
- No binario
- Prefiero no decirlo

Edad.

- 17-18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26-30
- 31-40
- 41-50
- + 50

Residencia habitual/procedencia ¿Dónde reside habitualmente? Ejemplo: *Camas (Sevilla)*, *Fuengirola (Málaga)*, *Jerez de la Frontera (Cádiz)*, etc... Poner provincia entre paréntesis.

Residencia durante el curso ¿Dónde reside habitualmente durante el curso? Ejemplo: *Sevilla (Sevilla)*, *Dos Hermanas (Sevilla)*, *Alcalá de Guadaíra (Sevilla)*, *Cádiz (Cádiz)*, etc...

Estudios que está cursando.

- Grado en Geografía e Historia
- Grado en Ciencias Ambientales y en Geografía e Historia
- Grado en Geografía e Historia y Relaciones Internacionales

¿Desde qué año está matriculado en la UPO?

¿Cuán fue tu primer año académico en la UPO?

- 2022-2023
- 2021-2022
- 2020-2021
- 2019-2020
- 2018-2019
- 2017-2018 o anterior

Curso que cursa actualmente.

- Primero
- Segundo
- Tercero
- Cuarto
- Quinto
- Ninguno de los anteriores

Situación laboral.

- Estudiante a tiempo completo
- Empleado a media jornada
- Empleado a jornada completa
- Empleado en rango de prácticas
- Otro:

¿Tiene permiso de conducir?

- Sí
- No

¿Tiene algún tipo de bono de alquiler de bicicleta o patinete? (Sevici, Lime, etc.)

- Sí
- No

¿Tiene algún bono de transporte ferroviario? (Metro, Cercanías, Media Distancia, etc.) Ejemplo: Bono de cercanías, Bono de media distancia, tarjeta joven de transportes de Andalucía, etc.

- Sí
- No

¿Tiene algún tipo de bono de autobús? (Urbano, interurbano) Bono Tussam, Bono Casal, Bono del Consorcio de Transportes del Área Metropolitana de Sevilla, etc.

- Sí
- No

Medio de transporte empleado en el pasado curso para llegar a la UPO. ¿Cómo se desplazaba a la UPO antes de la bonificación de transportes? En el caso de ser estudiante de nuevo ingreso, como se desplazaba a su anterior centro de estudios.

- Coche
- Moto
- Metro
- Autobús
- Bicicleta o monopatín
- Otro

Medio de transporte empleado en este curso para llegar a la UPO. Medio de transporte que usa para acudir a la UPO en el presente curso.

- Coche
- Moto
- Metro
- Autobús
- Bicicleta o monopatín
- Otro

¿La existencia de las medidas ha modificado sus pautas de movilidad cotidiana? Desde que se han introducido las bonificaciones de transporte, ¿usas más el transporte público?

- Sí
- No
- Son iguales

Medio de transporte empleado en sus desplazamientos cotidianos. ¿Como te mueves en tu día a día? ¿Cuál es el medio de transporte que más empleas?

- Bus
- Metro
- Sevici/lime
- Coche
- Moto
- A pie

¿Conoce las medidas implantadas por el Gobierno Central para potenciar el uso del transporte público?

- Sí
- No

¿Cómo se han enterado de las medidas?

- Redes sociales
- Prensa
- Telediaros
- Canales oficiales del estado
- Boca a boca
- Otros

La existencia de las medidas ha modificado sus pautas de movilidad cotidiana ¿Aumentó el uso del transporte público?

- Notablemente
- Sí, pero no mucho
- Apenas
- No

¿Estas medidas han condicionado su residencia durante el curso?

- Sí
- No

¿Cómo valoras, en general la medida implantada? Siendo 0 la menor calificación y 5 la mayor.

- 0
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- No conocía la medida

Referencias

- Ameneiro, A. (2021, October 30). Sevilla ocupa la séptima posición nacional en movilidad sostenible. *Diario de Sevilla*. https://www.diariodesevilla.es/la-catenaria/Sevilla-movilidad-sostenible-indice-Idencity-2021_0_1624339602.html
- Ayuntamiento de Sevilla (2021). *Plan de Movilidad Urbana Sostenible del municipio de Sevilla. Diagnóstico*. https://www.sevilla.org/actualidad/blog/plan-de-movilidad-urbana-sostenible-de-sevilla/pm-us-sevilla-diagnostico_v34.pdf
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>
- Barbero, J. A. & Rodríguez, R. (2012). Transporte y cambio climático: hacia un desarrollo sostenible y de bajo carbono. *Revista Transporte y Territorio*, (6), 8-26. <https://doi.org/10.34096/rtt.i6.273>
- Barriada, M. (1999). Balance ecológico do transporte universitario nos campus de Elviña e a Zapateira (A Coruña). *Adega cadernos*, (5), 35-40. http://adega.gal/web/media/documentos/caderno_5_artigo_3.pdf
- Benítez, M. (2021, September 28). La Universidad Pablo de Olavide construirá una planta fotovoltaica para autoabastecerse. *ABC de Sevilla*. https://sevilla.abc.es/sevilla/sevi-construira-planta-fotovoltaica-para-autoabastecerse-202109281846_noticia.html
- Bilbao, J. & Fernández, A. (2004). The influence of quality and price on the demand for urban transport: the case of university students. *Transport Research Part A: Policy and Practice*, 38(8), 607-614. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2004.04.004>
- Bryan, D. L. & O'Kelly, M. E. (2002). Hub-and-Spoke Networks in Air Transportation: An Analytical Review. *Journal of Regional Science*, 39(2), 275-295. <https://doi.org/10.1111/1467-9787.00134>
- Chatterjee, K., Goodwin, P., Schwanen, T., Clark, B., Jain, J., Melia, S., Middleton, J., Plyushteva, A., Ricci, M., Santos, G. and Stokes, G. (2018). Young People's Travel – What's Changed and Why? Review and Analysis. Report to the Department for Transport. *The Centre for Transport & Society, UWE Bristol & Transport Studies Unit, University of Oxford*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/673176/young-peoples-travel-whats-changed.pdf
- Consejería de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda (2019). *Plan de Infraestructuras de Transporte y Movilidad de Andalucía (PITMA 2030)*. Junta de Andalucía. https://www.juntadeandalucia.es/sites/default/files/inline-files/2023/01/version_final_pitma_sf.pdf
- Consortio de Transporte Metropolitano del Área de Sevilla (2022). *Memoria 2022*. Consejería de Fomento, Articulación del Territorio y Vivienda. Junta de Andalucía.
- Crespo, N., Palomo, M. T. & Méndez, M. (2012). El efecto del absentismo universitario en el expediente académico y en la percepción de sus causas. *Revista de Educación en Contabilidad, Finanzas y Administración de Empresas*, (3), 47-65. <https://dx.doi.org/10.12795/EDUCADE.2012.i03.04>
- Dawood, S. A. A. & Rahmat, R. O. K. (2015). Factors that Affect Cycling Transportation Mode for Postgraduate Students at Universiti Kebangsaan Malaysia by Logit Method. *Jurnal Kejuruteraan*, 27, 1-7. <http://dx.doi.org/10.17576/jkukm-2015-27-01>
- Delmelle, E. M. & Cahill, E. (2012). Exploring spatio-temporal commuting patterns in a university environment. *Transport Policy*, 21, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.12.007>
- Esteve, H. (2021). *Unicar App. Aplicación web donde compartir coche para ir a la universidad*. Universidad de Alicante. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/116939>
- Forsyth, A., Weinstein, A. & Krizek, K. J. (2012). Simple, Inexpensive Approach to Sampling for Pedestrian and Bicycle Surveys. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2299(1), 22-30. <https://doi.org/10.3141/2299-03>
- Gallo, M. & Marinelli, M. (2020). Sustainable Mobility: A Review of Possible Actions and Policies. *Sustainability*, 12(18), 1-39. <https://doi.org/10.3390/su12187499>
- Gavira, A., Cuevas, A.M. y Ventura, J. (2020). Ciclabilidad, intermodalidad y movilidad sostenible de la comunidad universitaria en Sevilla. *Cuadernos de Geografía*, 105, 51-74. <https://doi.org/10.7203/CGUV.105.16656>

- Gurrutxaga, I., Iturrate, M., Osés, U., & García, H. (2017). Analysis of the modal choice of transport at the case of university: Case of University of the Basque Country of San Sebastian. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 105, 233-244. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.04.003>
- Gutiérrez, A. I. (2012). ¿Qué es la movilidad? Elementos para (re) construir las definiciones básicas del campo del transporte. *Bitácora Urbano Territorial*, 21(2), 61-74. https://revistas.unal.edu.co/index.php/bitacora/article/view/29076/pdf_164
- Gutiérrez, J. A. & Jaraíz, F. J. (Coord.) (2018). *Plan de movilidad sostenible de la Universidad de Extremadura. Diagnóstico de la movilidad en los Campus*. Universidad de Extremadura, servicio de publicaciones. <https://acortar.link/0wWXAO>
- Hensher, D. A. (1998). The imbalance between car and public transport use in urban Australia: why does it exist? *Transport Policy*, 5(4), 193-204. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(98\)00022-5](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(98)00022-5)
- Jaraíz, F. J., Castro, J. & Gutiérrez, J. A. (2018). Metodología para la generación de un modelo de movilidad sostenible en la UEx. In *Plan de movilidad sostenible de la Universidad de Extremadura. Diagnóstico de la movilidad en los campus* (pp. 25-53). Universidad de Extremadura, Servicio de Publicaciones. <https://dehesa.unex.es/handle/10662/15402>
- Las bonificaciones al transporte público impulsan la recuperación del sector (2022). *ATUC: movilidad sostenible*, 104, 29. https://www.atuc.es/sites/default/files/revista/pdf/revista_atuc_104.pdf
- Lara, M. T. (2007). Cambio climático: una preocupación creciente. *Economistas*, (113), 78-85. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2315357>
- Larkham, P. J. (2000). Institutions and urban form: the example of universities. *Urban Morphology*. 4(2), 63-77. <https://doi.org/10.51347/jum.v4i2.3890>
- Ley 2/2003, de 12 de mayo, de Ordenación de los Transportes Urbanos y Metropolitanos de Viajeros en Andalucía. *Boletín Oficial del Estado* núm. 145, § 1 (2003). <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2003-12100>
- Lucas, F., Racero, J., Torrecillas, C., & García, J.M. (2015). Análisis de la movilidad en campus universitarios integrados en zonas urbanas. *Dyna*, 91(3), 336-345. <https://doi.org/10.6036/7660>
- Luque, D. M. (2022, April 17). El impacto de la universidad en la movilidad urbana. *Espacios de educación superior*. <https://www.espaciosdeeducacionsuperior.es/17/04/2022/el-impacto-de-la-universidad-en-la-movilidad-urbana-%EF%BF%BC/>
- Maciejewska, M., Miralles-Guasch, C., & Marquet, O. (2020). Perfiles de población y uso de los transportes motorizados. Evidencias desde el campus de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 66(3), 629-648. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.553>
- Mataix-González, C. (2010). *Movilidad Urbana Sostenible: Un reto energético y ambiental*. Fundación de la energía. <https://www.fenercom.com/publicacion/movilidad-urbana-sostenible-un-reto-energetico-y-ambiental-2010/>
- Metro de Sevilla (2023). *Balance anual 2022*. Junta de Andalucía. https://www.aopandalucia.es/inetfiles/agencia_estructura/271202382847.pdf
- Millard-Ball, A., Siegman, P. & Tumlin, J. (2004). Solving campus parking shortages: new solutions for an old problem. *Planning for Higher Education*, 33(1), 30-43. <https://eric.ed.gov/?id=EJ847964>
- Ministerio de Fomento (2019). *Agenda Urbana Española*. Gobierno de España. <https://apps.fomento.gob.es/CVP/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BAW061>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2021). *Estrategia de Movilidad Segura, Sostenible y Conectada 2030 (EsMovilidad)*. Gobierno de España. <https://esmovilidad.mitma.es/>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2022a). *Anteproyecto de Ley de Movilidad Sostenible*. Gobierno de España. <https://www.mitma.gob.es/el-ministerio/campanas-de-publicidad/ley-de-movilidad-sostenible-y-financiacion-del-transporte/ley/titulo-preliminar/articulo1objeto-y-finalidad-de-la-ley>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2022b). *Áreas urbanas en España 2022*. Gobierno de España. <https://cvp.mitma.gob.es/downloadcustom/sample/3152>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022). *Inventario nacional de emisiones a la atmósfera. Emisiones de gases de efecto invernadero. Serie 1990-2020*. Secretaría de Estado de Medio

- Ambiente. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/resumen_inventario_gei-ed_2022_tcm30-534394.pdf
- Montero, T. (2019, January 14). Solo el 5 % de los universitarios son de otras comunidades autónomas. *La Voz de Galicia*. <https://www.lavozdegalicia.es/noticia/educacion/2019/01/13/solo-5-universitarios-comunidades-autonomas/00031547388314381638939.htm>
- Montull, A (2017). *Anàlisi territorial de la preinscripció al sistema universitari públic de Catalunya. L'efecte distància–temps des del domicili habitual en l'elecció de centre i estudi*. Universitat de Barcelona. <http://hdl.handle.net/2445/112948>
- Morales, L. (2021, July 13). La mitad de los jóvenes ya no se saca el carné: “Tener coche es un lujo”. *El Confidencial*. https://www.elconfidencial.com/espana/2021-07-13/jovenes-carnet-conducir-coche-lujo_3169203/
- Nash, S. & Mitra, R. (2019). University students' transportation patterns, and the role of neighbourhood types and attitudes. *Journal of Transport Geography*, 76, 200-211. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.03.013>
- Parra, G. (2019, October 4). Jaén, con 4.000, es la provincia que más estudiantes aporta a la UGR. *Ideal*. <https://www.ideal.es/miugr/jaen-4000-provincia-mas-estudiantes-ugr-universidad-granada-20191004202512-nt.html>
- Pavón, G. & Quiles, F. (2005). La Universidad Laboral de Sevilla, Arquitectura en el Paisaje. *Atrio. Revista de Historia del Arte*, 10/11, 125-132. <https://www.upo.es/revistas/index.php/atricio/article/view/304/295>
- Resolución de 12 de agosto de 2022, de la Secretaría de Estado de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, por la que se establecen las condiciones de aplicación de las medidas de fomento del transporte colectivo establecidas en el artículo 7 del Real Decreto-ley 14/2022, de 1 de agosto, en relación a la reducción del precio de abonos y títulos multiviaje por parte de Renfe Viajeros, S.M.E., SA, así como las relativas a la creación de títulos multiviaje y bonificación de su precio en determinadas rutas de servicios ferroviarios prestados sobre la red ferroviaria de alta velocidad. *Boletín Oficial del Estado* núm. 198, § 1 (2022). <https://www.boe.es/boe/dias/2022/08/18/pdfs/BOE-A-2022-13866.pdf>
- RTVE (2021, July 26). España registra por primera vez más personas con estudios superiores que con ESO. <https://www.rtve.es/noticias/20210726/estadisticas-estudios-superiores-eso/2139221.shtml>
- Saladié, O. & Jurado, J. (2015). La movilidad en el campus de Vila-Seca de la URV: Propuestas para una movilidad más sostenible. *Investigaciones geográficas*, (64), 163 – 182. <https://doi.org/10.14198/INGEO2015.64.10>
- Seguí, J. M. & Ruiz, M. (2020). Los desplazamientos cotidianos al campus universitario periférico. Movilidad y sostenibilidad: el caso de la Universidad de las Islas Baleares, Palma. *Sud-Ouest Européen*, (50), 33-49. <https://doi.org/10.4000/soe.7082>
- Universitat Autònoma de Barcelona (2015, January 15). Aumenta el uso del transporte público entre los universitarios. *Universitat Autònoma de Barcelona*. <https://acortar.link/SYQ7su>
- Universitat Autònoma de Barcelona (2020, January 15). Nunca tantas personas habían utilizado el transporte público para desplazarse hasta la UAB como ahora. *Universitat Autònoma de Barcelona*. <https://www.uab.cat/web/sala-de-prensa/detalle-noticia/nunca-tantas-personas-habian-utilizado-el-transporte-publico-para-desplazarse-hasta-la-uab-como-ahora-1345830290069.html?detid=1345805118861>
- Universidad Pablo de Olavide (2023). *UPO en cifras. Memoria 2022-2023*. <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/memoria/documentos/UPO-en-CIFRAS.pdf>
- Vahí, A., Rodríguez, V. & Hurtado, C. (2015). Centralidad funcional y reconfiguración metropolitana. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (68), 7 - 29. <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/1851/1767>
- Valenzuela, L. M., Soria, J. A. & Talavera, R. (2011). *Metro ligero e innovación para la movilidad sostenible de las áreas metropolitanas andaluzas*. Centro de Estudios Andaluces. <https://www.centrodeestudiosandaluces.es/publicaciones/descargar/517/documento/1049/Actualidad46.pdf>



Análisis de las imágenes sobre riesgos naturales en los manuales escolares de Ciencias Sociales (España). Catastrofismo y realidad territorial

Analysis of images of natural hazards in the school textbooks of Social Sciences (Spain). Catastrophism and territorial reality

AUTORÍA

Álvaro-Francisco Morote 

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, Universidad de Valencia, Valencia – España.

Jorge Olcina 

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física, Universidad de Alicante, Alicante – España.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.26584>

CITACIÓN

Morote, Á-F. & Olcina, J. (2024). Análisis de las imágenes sobre riesgos naturales en los manuales escolares de Ciencias Sociales (España). Catastrofismo y realidad territorial. *Investigaciones Geográficas*, (81), 93-108. <https://doi.org/10.14198/INGEO.26584>

CORRESPONDENCIA

Álvaro-Francisco Morote (alvaro.morote@uv.es)

HISTORIA

Recibido: 11 septiembre 2023
Aceptado: 2 enero 2024
Publicado: 26 enero 2024

TÉRMINOS

© Álvaro-Francisco Morote y Jorge Olcina

 Este trabajo se publica bajo una licencia Creative Commons de Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Resumen

En la actualidad, los contenidos sobre los riesgos naturales están teniendo un interés notable en el ámbito educativo debido a la acción formativa y de concienciación de los más jóvenes. El objetivo de este trabajo es examinar las imágenes que se recopilan en los libros de texto de Ciencias Sociales (3^{er} ciclo de Educación Primaria) que hacen referencia a riesgos naturales, con la finalidad de analizar el tipo de riesgo, grado de catastrofismo, y el contexto territorial al que se adscriben para explicar estos fenómenos en España. A partir de la revisión de las principales editoriales españolas (Anaya, Bromera, Santillana, SM, Vicens Vives), los resultados obtenidos ponen de manifiesto que, de 640 imágenes identificadas, la mayoría hacen referencia a las sequías (38,2%) e inundaciones (29,4%). Respecto al grado de catastrofismo, el 67,6% se presentan con esta finalidad, y en cuanto al contexto territorial, en la mayoría (79,4%), no se identifica la localización geográfica. Como conclusión cabe destacar que la educación para el riesgo en las etapas formativas iniciales es fundamental en el contexto actual de cambio climático para la formación de sociedades más resilientes, pero debe estar basada en el rigor científico de los mensajes a comunicar.

Palabras clave: riesgos naturales; manuales escolares; Geografía; Educación Primaria; imágenes; catastrofismo.

Abstract

Currently, the content on natural hazards has been attracting significant interest from the educational field due to the awareness-raising and training efforts carried out among the younger cohorts. The objective of this research is to analyze the images that are inserted in the school textbooks of Social Sciences (3rd cycle of Primary Education) that refer to natural hazards, the type of risk, the degree of catastrophism, and the territorial context to which they are assigned to explain these phenomena in Spain. Based on a review of the main publishers used in Spain (Anaya, Bromera, Santillana, SM, Vicens Vives), the results obtained show that, out of 640 images identified, most of them refer to droughts (38.2%) and floods (29.4%). Regarding the degree of catastrophism, 67.6% are presented with this purpose, and as for the territorial context, in the majority (79.4%) the geographical location is not known. In summary, risk education in the initial training stages is essential in the current

climate change context for the formation of more informed and safer societies. However, the messages to be communicated must be based on scientific rigor.

Keywords: natural hazards; school manuals; Geography; Primary Education; pictures; catastrophism.

1. Introducción

El estudio actual de los riesgos naturales, en estrecha relación —para los de causa atmosférica— con el proceso de cambio climático por efecto invernadero de causa antrópica ha cobrado una dedicación creciente en la materia de Ciencias Sociales (Geografía) del sistema educativo español (Educación Primaria y Secundaria Obligatoria) debido al interés en formar y concienciar a la población joven sobre estos fenómenos (Chang & Pascua, 2016; Díez-Herrero et al., 2021; Kurup et al., 2021; Shepardson & Hirsch, 2020).

En relación con el cambio climático, diferentes autores (Caride & Meira, 2019) insisten en que este fenómeno debe ser un tema de enseñanza necesario para la educación del siglo XXI debido a los efectos presentes que ya se manifiestan, y a los previsibles en las próximas décadas (Pastor et al., 2020). Según indica el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (2022), los fenómenos atmosféricos extremos (episodios de lluvias intensas, sequías, olas de calor, etc.), serán en el futuro cada vez más frecuentes e intensos. En latitudes mediterráneas el proceso actual de cambio climático se manifiesta ya con una pérdida de confort térmico (Martín-León, 2018), con un régimen de precipitaciones de mayor irregularidad e intensidad (Ferreira, 2021; Oria, 2021; Serrano-Notivoli et al., 2018; Zittis et al., 2021) y, como se ha señalado, con el desarrollo más frecuente de eventos atmosféricos extremos (Cramer et al., 2018). Todo ello está condicionado por la acumulación de calor que se registra en algunas cuencas marinas del planeta, entre ellas, la cuenca mediterránea (Pastor et al., 2020).

El interés por este estudio, asimismo, se debe por la influencia que la enseñanza de los riesgos naturales pueda llegar a tener en la percepción del alumnado y, en definitiva, en la educación como herramienta de adaptación y resiliencia a estos fenómenos. Por este motivo, existe la urgencia de lograr una sociedad más concienciada y formada sobre estos episodios (Caride & Meira, 2019). La enseñanza de los riesgos naturales en España queda avalada en la normativa desde varias esferas. Por un lado, desde el ámbito educativo, ya que su tratamiento es una cuestión que se recoge en el currículo de Educación Primaria (etapa objeto de estudio), tanto en el anterior Real Decreto 126/2014, de 28 de febrero como en el actual Real Decreto 157/2022, de 1 de marzo. Y por otro, desde las leyes estatales, ya que llama poderosamente la atención que sólo desde 2021 es cuando se dispone de una ley nacional sobre cambio climático en la que se dedica un apartado a la enseñanza de este fenómeno y su adaptación (Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética).

Cabe insistir que estos “saberes básicos” llevan años respaldados para su implementación en las aulas escolares desde el ámbito internacional como ya recogía el Quinto Informe del IPCC (2014) y la Organización de Naciones Unidas (ONU) (2015) con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Agenda 2030) (ODS nº13 “Acción por el clima”). Aunque también es cierto que en la práctica, como indican Morote y Olcina (2023), a pesar de que el factor educación es una de las acciones no estructurales más necesarias para la adaptación al calentamiento global, tradicionalmente es un elemento que no se ha valorado. No obstante, se encuentran experiencias a nivel de centro en los últimos años en torno al medio, el clima, el reciclaje, adaptación al cambio climático, etc. (Estrella, 2020; Santana et al., 2021).

Para explicar los riesgos naturales, estos se deben enseñar teniendo en cuenta tanto los factores naturales como humanos (Morote & Olcina, 2022). Autores referentes en materia de riesgos naturales como White (1974), Giddens (1977) y Beck (1986) analizaron la sociedad contemporánea como una sociedad del riesgo, donde el factor vulnerabilidad tiene un papel relevante, incluso en ocasiones más importante que el propio evento atmosférico (Pérez-Morales et al., 2021). Por ello, resulta necesario explicar diferentes factores: 1) peligrosidad del fenómeno natural que puede ocasionar un episodio potencialmente catastrófico; 2) vulnerabilidad del grupo humano y/o la actividad que puede verse influenciada por el desarrollo de un episodio natural extremo; y 3) exposición o territorio afectado ante un evento de raigambre extremo (Ward et al., 2020). Wisner et al. (2004) argumentan que la acción conjunta de estos tres componentes y, teniendo en cuenta las características socio-económicas, tanto del grupo humano (sociedad) como del territorio, y la frecuencia de aparición de dichos episodios extremos, determinan el grado de riesgo.

En España, en relación con los libros de texto de Ciencias Sociales, estos recursos, continúan siendo el principal utilizado en las aulas, incluso a veces el único (Rodríguez et al., 2017). Bel et al. (2019), Prats (2012), Sáiz (2011), Tonini et al. (2016) y Valls (2008) indican el interés que han tenido estas herramientas

en la investigación en Didáctica de las Ciencias Sociales ya que son fuentes documentales privilegiadas que posibilitan, aunque con limitaciones, aproximarse a lo que se enseña en clase. Sin embargo, desde la Didáctica de la Geografía, y más concretamente sobre cuestiones relacionadas con los riesgos naturales, las investigaciones son escasas. Esta situación aún se agrava más para el caso de los estudios que revisan las imágenes de los manuales de Geografía o sobre contenidos geográficos. García-Francisco et al. (2009) hace una década, argumentaban en relación con los contenidos vinculados con los problemas ambientales, que las publicaciones sobre manualística eran escasas y no existía una metodología específica para revisar dichos contenidos. Respecto al clima y cambio climático se han realizado diferentes trabajos que analizan los manuales (Ciencias Sociales y/o Geografía) (Martínez-Medina & López-Fernández, 2016; Ramos & Calonge, 2014). En vinculación con los riesgos naturales, para el caso español cabría destacar las contribuciones sobre la sequía (García-Francisco et al., 2009) o las inundaciones (Morote et al., 2023). Respecto al ámbito internacional cabría citar el estudio de Seddighi et al. (2021) sobre la representación de los riesgos naturales en los libros escolares para los niños con discapacidad intelectual (Irán).

El presente trabajo, a partir de la revisión de manuales de Ciencias Sociales (3^{er} ciclo de Educación Primaria) plantea los siguientes objetivos en relación con las imágenes sobre riesgos naturales: 1) analizar el número de éstas y a qué riesgo hacen referencia; 2) grado de catastrofismo; y 3) el contexto territorial al que se adscriben.

En cuanto a la pregunta de investigación, se plantea si ¿los libros de texto contienen imágenes que permiten la comprensión de los riesgos naturales como un fenómeno socio-natural? Y, respecto a las hipótesis de partida, se establece que la mayoría de las imágenes harían referencia a las inundaciones y sequías por ser los fenómenos más recurrentes en España. En segundo lugar, estas imágenes destacarían por presentar un elevado grado de catastrofismo (fotografías donde se reflejarían las consecuencias negativas) y por insertarse en el temario sin contextualizar el área territorial al que se adscriben.

2. Metodología

Para llevar a cabo este trabajo, metodológicamente se ha seguido un procedimiento de análisis similar al de publicaciones previas que se han realizado desde la Didáctica de la Geografía. Por ejemplo, los estudios que han analizado las definiciones y problematización de las actividades en los libros de texto sobre riesgos naturales (Morote & Olcina, 2022), o los contenidos que se explican sobre la sequía (Morote, 2021). Y ello porque dicho método se ha comprobado válido para el análisis de contenidos sobre riesgos naturales o sobre incorporación de aspectos del cambio climático en el sistema educativo español. En el presente trabajo se ha adaptado el procedimiento de estos estudios previos teniendo en cuenta los objetivos planteados (imágenes sobre riesgos naturales): 1) tipo de fenómeno; 2) grado de catastrofismo; y 3) contexto territorial. Se trata de un método hipotético-deductivo que parte de la idea de la importancia de la imagen en el proceso educativo en los niveles básicos de la enseñanza. En particular, la enseñanza del riesgo tiene en la imagen un valor fundamental; pero la imagen debe estar bien seleccionada, justificada científicamente, y no caer en lo llamativo y carente de base científica.

El presente estudio ha revisado los manuales escolares vigentes en su momento (LOMCE, 2013), ya que no ha sido hasta el curso académico 2023-2024 cuando se están utilizando en todos los cursos de Educación Primaria (pares, impares) las nuevas ediciones. Aunque no se han apreciado cambios notables entre las ediciones actuales y pasadas de estos manuales escolares. No obstante, esta cuestión plantea nuevos retos de investigación futura. Teniendo en cuenta el currículo escolar de Educación Primaria (Real Decreto 126/2014 de 28 de febrero) (etapa de estudio), los contenidos sobre la temática de los riesgos naturales se deben enseñar en la materia de Ciencias Sociales (Bloque 2, “El mundo en el que vivimos”). En este bloque se insertan aquellos contenidos que se vinculan con la denominada Geografía Física (clima y tiempo atmosférico, cambio climático, problemas ambientales, la hidrografía, etc.). Asimismo, cabe hacer notar que en este trabajo se han tenido en cuenta como “riesgos naturales” aquellos fenómenos de la naturaleza extremos, tanto atmosféricos (climáticos) como geológicos.

En segundo lugar, se han analizado las principales editoriales que se utilizan en el territorio español (Anaya, Bromera, Santillana, SM, Vicens Vives), y los manuales del 3^{er} ciclo de Educación Primaria (5^o y 6^o); (las cinco editoriales se han analizado en ambos cursos). En cuanto a estas editoriales, autores referentes en la manualística española han puesto de manifiesto que estas representan el 75% de las utilizadas en el conjunto del territorio español (Valls, 2007). Y respecto al número de manuales, metodológicamente la muestra (n=10) es lo suficientemente amplia como justifican contribuciones previas realizadas en Ciencias Sociales (García-

Francisco et al., 2009; Sáiz, 2011; Valls, 2007). En relación con el temario revisado, se han consultado las unidades didácticas sobre Geografía Física (clima y tiempo atmosférico, hidrografía, etc.).

En cuanto al procedimiento de análisis, cabe destacar que, como imágenes, se ha tenido en cuenta todo el material gráfico que se inserta en los manuales (fotografías y dibujos principalmente). No se han seleccionado, por ejemplo, los climogramas o gráficas. En primer lugar, se ha realizado una revisión y conteo de todas las imágenes que se recogen en el temario con el fin de identificar aquellas que tienen que ver con algún riesgo natural. El objetivo, por tanto, es categorizar y analizar cuáles son las ilustraciones que se insertan sobre estos fenómenos. Para ello, se han examinado globalmente (en conjunto con todas las editoriales) y en función de la editorial y curso.

A continuación, se ha estudiado el grado de catastrofismo de estas. Según la Real Academia de la Lengua (RAE), ésta define “catastrofismo” como la “teoría según la cual los mayores cambios geológicos y biológicos se debieron a catástrofes naturales” (RAE, 2023a), y “catástrofe” como “suceso que produce gran destrucción o daño” (RAE, 2023b). Es cierto que cabe pensar que los riesgos naturales pueden abocar a desastres en el territorio, la población, las actividades económicas, etc., pero también, estos fenómenos tienen aspectos positivos como, por ejemplo, las inundaciones. No cabe olvidar que en la región mediterránea tradicionalmente se ha considerado como un recurso (recursos hídricos para la agricultura, almacenamiento de agua para usos domésticos, creación de suelos, etc.). Por tanto, la finalidad es comprobar qué perspectiva predomina sobre estas imágenes en los libros de texto. Una imagen sobre riesgos naturales debe escogerse para enseñar pautas de buen o mal comportamiento socio-territorial, no para fomentar el miedo ante un peligro natural como mensaje en la enseñanza. El catastrofismo que aborda este trabajo tiene que ver con la 2ª definición de este término incluida en la RAE “actitud de quien, exagerando con fines generalmente intimidatorios, denuncia o pronostica gravísimos males” (no se maneja la definición 1ª de dicho diccionario porque, además, es sesgada y parcial. No contempla los cambios climáticos o paisajísticos, de raigambre geográfica. Por tanto, no es una definición correcta porque olvida el componente geográfico consustancial al medio). De manera que en el presente trabajo se ha realizado un análisis objetivo basado en el mensaje que transmiten las imágenes sobre peligros naturales contenidas en los libros de texto.

Finalmente, se ha revisado el contexto territorial (localización más o menos exacta) de la ubicación de estas imágenes. Para ello, el criterio que se ha escogido es si en la propia imagen, en la explicación en el texto (cuando hace referencia a ella) o a pie de foto se inserta alguna explicación o ubicación exacta. Por ejemplo, no se ha tenido en cuenta si se relaciona con el “clima oceánico” o la “región mediterránea” ya que esto abarca regiones extensas y con peculiaridades territoriales y físico-ecológicas muy dispares.

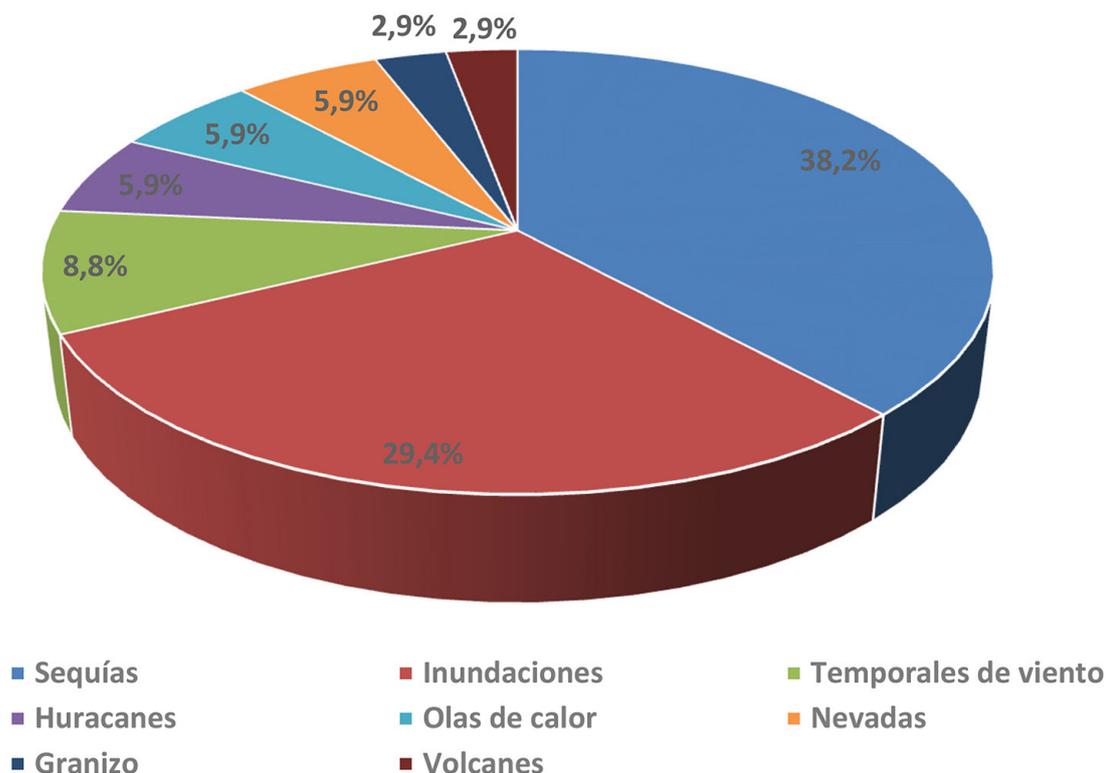
3. Resultados

3.1. ¿Qué riesgos naturales se explican en los manuales a partir de las imágenes?

Tras un primer análisis exploratorio del conjunto de las imágenes que se insertan en los manuales del 3º ciclo de Educación Primaria (Ciencias Sociales), se han contabilizado un total de 640. De éstas, el 5,3% (n=34) hacen referencia a algún tipo de riesgo. Cabe indicar que estas cifras son normales teniendo en cuenta que el temario se dedica, asimismo, a la enseñanza de contenidos muy variados. Aunque pueda parecer un número reducido, es sumamente importante que se recojan este tipo de ilustraciones que hacen alusión a estos fenómenos por las implicaciones de concienciación y formación de las cohortes más jóvenes. Se han identificado hasta 8 tipos de riesgos naturales: sequías, inundaciones (asociado a lluvias torrenciales), temporales de viento, huracanes, olas de calor, nevadas, granizo y volcanes.

Las imágenes, principalmente, hacen referencia a dos tipos de riesgos: 1) sequías (38,2%; n= 13); y 2) inundaciones (29,4%; n= 10) (ver Figura 1). Son, por tanto, los riesgos atmosféricos los principales que se identifican en los manuales a partir de las imágenes, siendo los geológicos, los minoritarios. Asimismo, son estos fenómenos (sequías e inundaciones) los más importantes que afectan a la península Ibérica en materia de víctimas mortales y daños económicos y/o materiales (Pérez-Morales et al., 2021). En cuanto a los geológicos, por ejemplo, tan sólo se destaca el vulcanismo (2,9%; n=1), obviando, por tanto, los sismos. Los primeros son de notable interés para ser tratados en el contexto español (especialmente por su vinculación con las Islas Canarias), y en cuanto a los segundos, se trata de un riesgo a tener en cuenta en determinadas regiones españolas (Andalucía oriental, Región de Murcia, Comunidad Valenciana, norte de Aragón, Galicia e Islas Canarias). Incluso se da más importancia a otros fenómenos, a priori, ajenos al contexto español como es el caso de los huracanes (5,9%; n= 2).

Figura 1. Imágenes sobre riesgos naturales que se recogen en los manuales de Ciencias Sociales (3er ciclo de Educación Primaria)



Elaboración propia

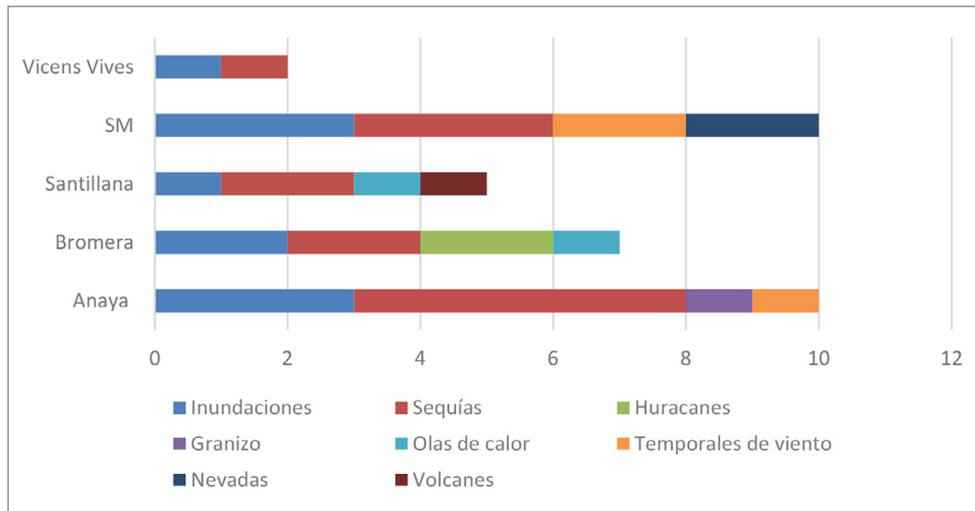
Si se analizan estos fenómenos en función del curso (5º o 6º) se puede observar que destaca la presencia de las imágenes en 5º (61,8%; n=21). En este cabe destacar que se inserta una amalgama mayor de riesgos naturales, que en 6º no aparecen como, por ejemplo: temporales de viento, olas de calor, nevadas, granizo (ver Tabla 1). La revisión de las imágenes en función de la editorial, pone de manifiesto que son Anaya y SM las que más ilustraciones insertan sobre estos fenómenos (ambas con el 29,4%; 10 cada una) (ver Figura 2). Para el caso de Anaya, esta editorial dedica una mayor atención a la sequía (n=5). En cuanto a Vicens Vives, es la editorial que menos imágenes utiliza para explicar estos fenómenos (el 5,9% del total; n=2; sequías e inundaciones).

Tabla 1. Imágenes sobre riesgos naturales que se recogen en los manuales de Ciencias Sociales (3er ciclo de Educación Primaria)

	5º	6º	Total	
	n	n	n	%
Sequías	6	7	13	38,2
Inundaciones	6	4	10	29,4
Temporales de viento	3	0	3	8,8
Huracanes	1	1	2	5,9
Olas de calor	2	0	2	5,9
Nevadas	2	0	2	5,9
Granizo	1	0	1	2,9
Volcanes	0	1	1	2,9
Total	21	13	34	100,0

Elaboración propia

Figura 2. Imágenes sobre riesgos naturales que se recogen en los manuales del 3^{er} ciclo de Educación Primaria (Ciencias Sociales) según la editorial



Elaboración propia

3.2. Los principales riesgos naturales que se reflejan en los manuales

3.2.1 Imágenes sobre la sequía

Como se ha comentado en el apartado anterior, las imágenes sobre la sequía, junto con las inundaciones, representan la mayoría de las ilustraciones que hacen mención a riesgos naturales (el 67,6%; n=23). Respecto al grado de catastrofismo, sobre la sequía, la mayoría (el 84,6%; n=11) se insertan en los manuales con una finalidad negativa (con un objetivo de dar una sensación catastrófica), donde predominan las fotografías de tierras cuarteadas, embalses o humedales secos, e incluso de desiertos (Tabla 2). Respecto a esto último, se incluyen imágenes de estos territorios y paisajes para explicar la sequía en España sin contextualizar la localización del lugar. En el 92,1% (n= 12) se desconoce la ubicación exacta de dónde está realizada la fotografía.

Tabla 2. Imágenes que se insertan para explicar la sequía



Editorial Anaya, 5º de Educación Primaria (Benítez et al., 2014)



Editorial Anaya, 6º de Educación Primaria (Benítez et al., 2015)



La sequía, que es la falta de precipitaciones durante un periodo largo de tiempo, produce daños en la naturaleza.

Editorial Santillana, 5º de Educación Primaria (Grence, 2015)



Editorial SM, 5º de Educación Primaria (Parra et al. 2014)

Elaboración propia

Por ejemplo, en el libro de Bromera (6°), no se indica dónde está realizada la fotografía, y además, se explica que la sequía es una consecuencia directa del cambio climático. Respecto a lo anterior, el manual de 5° de SM explica que el cambio climático provoca “sequías” (Tabla 2). Tampoco el manual de 6° (Anaya) no especifica dónde está realizada la fotografía que se inserta en vinculación con la sequía, aunque debe ser el Acueducto Tajo-Segura (ATS) (sureste peninsular). En el texto se indica que, para evitar la sobreexplotación de recursos hídricos, los trasvases son una opción. No debería insertarse este tipo de explicaciones en los libros de texto del s. XXI ya que reproducen la obsoleta vieja política hidráulica. También este manual explica que gracias a las depuradoras se puede tratar el agua que se consume en las ciudades y retornar al ciclo integral, o ser vertidas al mar, ríos, etc., sin contaminación. Contrasta esta explicación con la anterior del ATS.

3.2.2 Imágenes sobre inundaciones

El segundo riesgo más tratado, teniendo en cuenta las imágenes, son las inundaciones. Al igual que sucede con la sequía, la función que tienen dentro del manual es dar una sensación catastrófica (el 90,0%; n=9) y sin explicar el contexto territorial donde ha sucedido este fenómeno (el 90,0%; n=9). Son, por lo general, fotografías en las que se identifican los daños durante o después de una lluvia torrencial. Sin embargo, cabe destacar que se pierde la oportunidad de explicar los aspectos positivos de estos fenómenos. Por ejemplo, es el caso de una fotografía que inserta Bromera (5°) sobre una riada del río Monnegre en el azud de Sant Joan (Alicante) (Tabla 3). Se trata de una imagen que realmente describe la adaptación de la sociedad del sureste peninsular a este fenómeno, en el que tradicionalmente se veía el riesgo como recurso. Algo similar también sucede con la fotografía de lo que parece ser el monzón (sureste asiático) (editorial Santillana 6°) en el que incluso en la imagen se puede observar la adaptación de las viviendas construidas en altura. A pie de página se indica que “las inundaciones son algunos de los efectos del cambio climático” (Grence & Grogori, 2015, p. 79). En cualquier caso, sería recomendable indicar que estos fenómenos se podrán ver incrementados en intensidad y frecuencia, pero no ser una consecuencia directa. Sin embargo, algunas editoriales (aunque de forma minoritaria) sí que ubican correctamente el lugar donde ha sucedido el fenómeno, por ejemplo, Bromera (6°) con la explicación de la gota fría del 3-4 noviembre de 1987. En el texto se explica que es el record de lluvia en 24 horas (817 litros/m²; estación meteorológica de Oliva; Valencia) (Figura 3).

Tabla 3. Imágenes que se insertan para explicar las inundaciones



Editorial Anaya, 5° de Educación Primaria (Benítez et al., 2014)



Editorial Anaya, 6° de Educación Primaria (Benítez et al., 2015)



Editorial Bromera, 5° de Educación Primaria (Gregori & Viu, 2014)

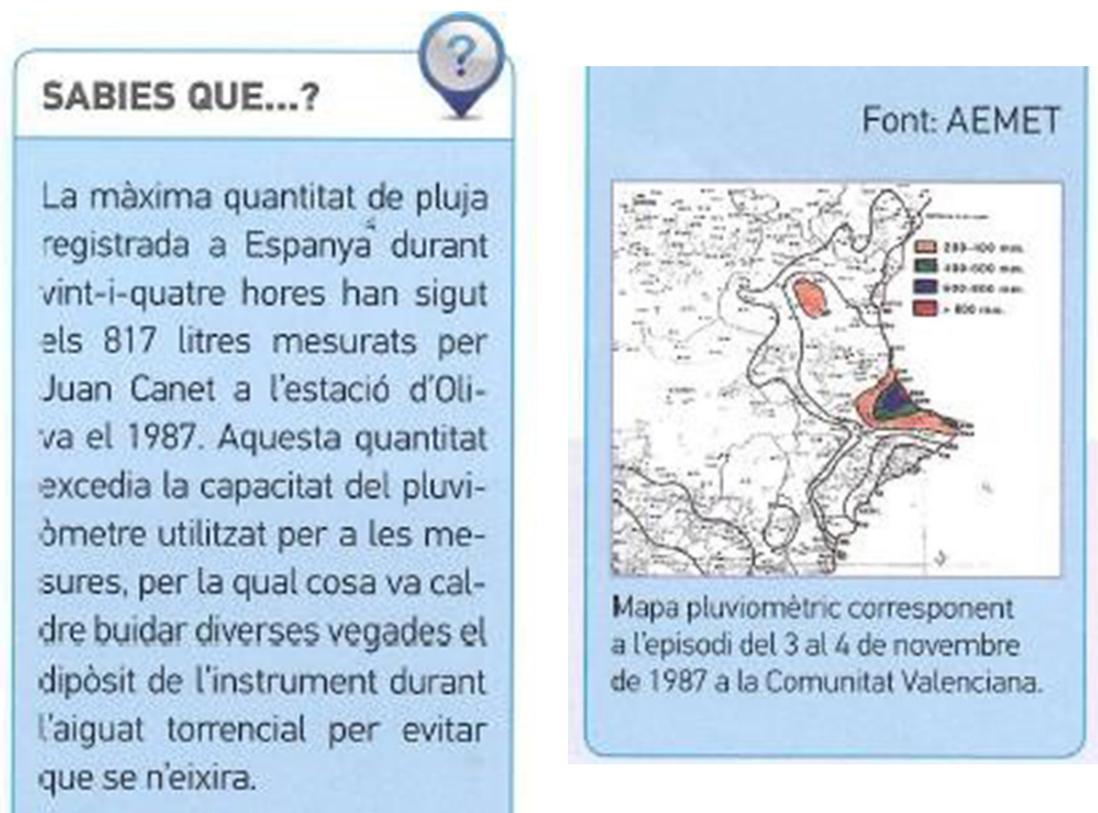


Interior peninsular

Editorial SM, 5° de Educación Primaria (Parra et al., 2014)

Elaboración propia

Figura 3. Imagen que se inserta para explicar las inundaciones (editorial Bromera, 6º de Educación Primaria)



Fuente: Gregori & Viu (2015)

3.3. Otras imágenes de riesgos naturales con notable repercusión e influencia en la sociedad y el territorio español

Junto a los riesgos naturales más destacados analizados en el epígrafe anterior, un segundo grupo con una menor representación se corresponde con los temporales de viento, huracanes, olas de calor y las nevadas. La mayoría de estos fenómenos aparecen dos veces ilustrados en los manuales (huracanes, olas de calor, nevadas), y tres veces los temporales de viento. Las imágenes vinculadas con los huracanes y temporales reflejan en su mayoría un mensaje catastrofista (Tabla 4). Debe señalarse que para el caso de los huracanes sería necesario que las imágenes incluyesen el mensaje de que son procesos meteorológicos que no se dan en España, porque no suele quedar claro en la explicación de los mismos y puede crear la falsa sensación de que se desarrollan en nuestro país. Para los temporales de viento, sería necesario distinguir entre los que proceden de borrascas atlánticas intensas que afectan especialmente al litoral cantábrico o al interior peninsular, y los que se originan en el área mediterránea que causan daños en la costa este peninsular e Islas Baleares.

Respecto a las olas de calor y las nevadas son imágenes meramente estéticas o de apoyo a los contenidos, pero en este caso no transmiten un mensaje catastrofista. Deberían incluir, por ejemplo, fotografías de termómetros oficiales de observatorios meteorológicos con indicación del valor de temperatura máxima alcanzada. Las imágenes de satélite que se incluyen para ilustrar este proceso no terminan de ser correctas, puesto que relacionan dos procesos que no siempre se dan de forma conjunta: desarrollo de crestas saharianas y llegada de polvo sahariano. Este último necesita corrientes de viento algo intensas en las capas bajas de la atmósfera para que se pueda movilizar la arena del Sáhara desde su fuente hasta latitudes ibéricas o el archipiélago canario. En todo caso, mejor que una imagen de satélite, se puede incluir una foto de turbidez atmosférica creada por el polvo sahariano en algún territorio concreto.

En cualquier caso, debe señalarse la falta de localización territorial de las imágenes seleccionadas en los manuales. Es necesario que las fotografías escogidas para explicar los temporales, nevadas u olas de calor estén "territorializadas" convenientemente. La falta de indicación de la localización exacta de las imágenes empleadas puede provocar cierto desconcierto y descontextualizar un fenómeno que sucede en la península Ibérica, pero se ilustra con fotografías de otras regiones o países del mundo. Las imágenes de palmeras con

las palmas inclinadas por el viento, que se muestran en los textos analizados pueden ser de cualquier país de la cuenca del Mediterráneo o de un país tropical, no específicamente de España como debería corresponder. Salvo las fotografías de olas de calor en las que se explica la localización geográfica —se puede ver que son imágenes de satélite de la región mediterránea, el Sáhara o las Islas Canarias— en el resto prácticamente no hay explicación del contexto territorial. Sorprende la excesiva atención de las fotografías que hacen mención a huracanes con paisajes tropicales, e incluso en alguna imagen se explica que es EE.UU., cuando no es un fenómeno que se pueda dar en España (editorial Bromera 5°).

Tabla 4. Imagen que se inserta para explicar los huracanes



Tornados als Estats Units.

Editorial Bromera, 5° de Educación Primaria
(Gregori & Viu, 2015)

Segunda imagen de la tabla retirada el 23-10-2024.

Elaboración propia

Finalmente, en un tercer grupo se han agrupado aquellas que tienen que ver con riesgos naturales que aparecen en los libros de texto de forma testimonial (tan sólo 2 fotografías). En este grupo se han integrado las imágenes que se vinculan con el granizo (editorial Anaya 5°) y los volcanes (Santillana 6°). Respecto al grado de catastrofismo que muestran no parece ser una condición importante en estas fotografías. Para los episodios de granizo se muestra un ejemplo del tamaño del mismo tras uno de estos episodios, mientras que para el caso de los volcanes se expone una fotografía del Parque Nacional de Timanfaya (Isla de Lanzarote, Islas Canarias). Resulta notable la ausencia de imágenes sobre efectos de terremotos que en España han registrado eventos importantes en los últimos años (Lorca en 2011). Son peligros, afortunadamente poco frecuentes, pero existentes en el territorio español y, por tanto, requieren de tratamiento en un proceso didáctico de educación para el riesgo.

En cuanto a la localización geográfica, en la imagen del granizo no se explica su localización, hecho que contrasta con la fotografía de los volcanes. Esta última se trata de una imagen estética y que sirve de apoyo al texto. En relación con este riesgo, cabe destacar que es el único riesgo geológico identificado en todos los manuales escolares consultados. Por tanto, las editoriales interpretan que los riesgos naturales son la mayoría “atmosféricos” (climáticos) y, sin embargo, no se tratan los geológicos. El caso del vulcanismo merecería una mayor atención en estos recursos (ediciones actuales) dadas las implicaciones actuales del volcán de Cumbre Vieja (La Palma, Islas Canarias).

4. Discusión de resultados

Con este trabajo se ha avanzado y cubierto el vacío científico respecto al análisis de las imágenes sobre riesgos naturales que se insertan en los manuales de Ciencias Sociales. Respecto a las hipótesis, éstas se cumplen. La primera establecía que “la mayoría de las imágenes harían referencia a las inundaciones y sequías por ser los fenómenos más recurrentes en España”. Se ha comprobado que estos acontecimientos atmosféricos son los principales que se reflejan. Las sequías y las inundaciones son los riesgos climáticos

primordiales que afectan al conjunto del territorio español (Pastor et al., 2020; Pérez-Morales et al., 2021; Vargas et al., 2022), y que, además, se verán acelerados (en intensidad y frecuencia) como indica el IPCC (2022). Los riesgos geológicos (vulcanismo, sismicidad, deslizamientos, desprendimientos, etc.), prácticamente no quedan reflejados en estos recursos escolares. Tan sólo aparece una imagen de los volcanes del Parque Nacional de Timanfaya y ninguna sobre seísmos. El episodio de erupción volcánica ocurrido en la Isla de La Palma (Cumbre Vieja, septiembre-diciembre 2021) está poniendo de manifiesto la importancia del vulcanismo activo en España que, por tanto, debería tener un tratamiento destacado en los libros de texto. Además, el abundante material gráfico que se ha generado en torno a este episodio eruptivo, puede ser de gran utilidad para su uso en el aula (vídeos, recursos informáticos, fotografías).

La interpretación que hacen las editoriales escolares a la hora de insertar explicaciones sobre riesgos naturales a partir de imágenes es que estos fenómenos son básicamente una cuestión atmosférica o climática, cuando realmente no es así. Incluso, en el catálogo de riesgos atmosféricos analizados falta la explicación de las olas de frío, tornados y mangas marinas, estos últimos con un protagonismo creciente en los últimos años. Asimismo, otros riesgos con menor presencia son los temporales de viento y los huracanes. Para el caso de los primeros, frecuentemente se utilizan fotografías que parecen estar tomadas de países tropicales, y respecto a los segundos, su inclusión es positiva en los manuales, pero se presentan escasamente contextualizados en el territorio español. En cuanto a la asociación de estos fenómenos en función de las editoriales se ha comprobado como ciertos riesgos son presentados exclusivamente por algunas editoriales. Así, por ejemplo, los huracanes se presentan en la editorial Bromera y las nevadas en SM.

En el ámbito internacional y nacional, no existe una producción científica destacada sobre el análisis de la explicación de estos fenómenos en los libros de texto (Seddighi et al., 2021). Tan sólo destacan algunas investigaciones sobre el cambio climático (Navarro et al., 2020; Serantes, 2015), la sequía (Morote, 2021), o las inundaciones (Morote et al., 2023). Además, existe una escasa presencia de publicaciones sobre el análisis de las imágenes sobre estos fenómenos. A diferencia de trabajos que tienen que ver con el análisis de manuales escolares, respecto a los riesgos naturales en la última década se han publicado investigaciones desde el ámbito educativo, especialmente aquellos vinculados con los riesgos de inundación, que tienen que ver con propuestas didácticas, análisis de representaciones sociales del alumnado, etc., en Europa (Bosschaart et al., 2016; Williams et al., 2017), EE.UU (Gary et al., 2014), Asia (Shah et al., 2020; Zhong et al., 2021) o África (Mudavanhu, 2015).

En relación con la segunda hipótesis, ésta establecía que las “imágenes destacarían por presentar un elevado grado de catastrofismo (fotografías donde se ven las consecuencias negativas), y por insertarse en el temario sin contextualizar el área territorial al que se adscriben”. Cabe destacar que los riesgos naturales, en la mayoría de las ocasiones, sus efectos se traducen en efectos negativos (víctimas mortales, pérdidas económicas, daños materiales, etc.), por tanto, es lógico pensar que las ilustraciones que se puedan incorporar en los manuales reflejen esas consecuencias. Sin embargo, no se debe olvidar que estos fenómenos también llevan asociados diferentes aspectos positivos, caso de las inundaciones con la recogida y/o almacenamiento de agua, fertilizar los campos, creación de suelos, etc. En ninguno de los libros de texto estas peculiaridades se han recogido. Otros trabajos, Morote y Olcina (2022), en relación con la revisión de contenidos sobre el calentamiento global (manuales de Educación Primaria) han destacado que algunas imágenes que se vinculan con el cambio climático y sus consecuencias (inundaciones y sequías) se presentan con un elevado grado de catastrofismo y sensacionalismo (osos polares en lo que parece ser un trozo de hielo que se está deshaciendo, fotografías sobre contaminación, deforestación, etc.).

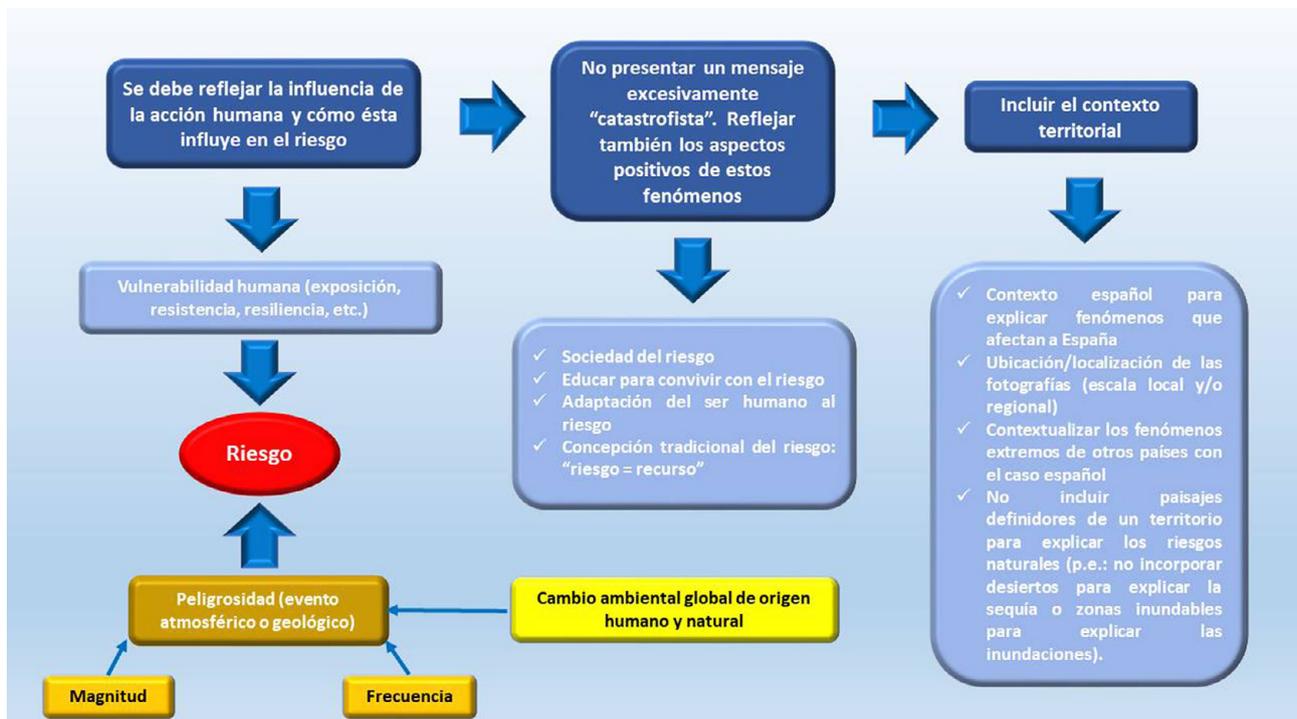
La relación con estos eventos extremos, en el caso de los peligros climáticos, y del proceso actual de cambio climático resulta cada vez más evidente (IPCC, 2022). No obstante, Morote y Olcina (2021), señalan que el uso de un mensaje excesivamente catastrofista en los libros de texto de enseñanzas no universitarias puede tener efectos contrarios. La información y actividades que se deben proponer no deben ser muy complicadas e, incluso, para la etapa de Educación Primaria resulta positivo incorporar información sobre decálogos para que complementen las cuestiones vinculadas sobre el calentamiento planetario (Morote & Olcina, 2021).

Las imágenes insertas en los libros de texto no pueden transmitir una idea de exageración, ni tener fin intimidatorio, para el alumnado o el profesorado que enseñe esta materia. Dicha imágenes pueden ser de 3 tipos donde se vea: 1) efectos de peligros naturales ocurridos (porque ya han sucedido y son la realidad); 2) causas (naturales y humanas) que favorecen el desarrollo de una catástrofe; y 3) ejemplos de buenas prácticas para reducir el riesgo (que no la catástrofe) ante un peligro natural en un territorio.

Por tanto, siguiendo estas pautas, por ejemplo, para explicar una sequía no es correcta una imagen de un suelo cuarteado, a modo de preludio del “desierto”. Debe mostrarse, por ejemplo: un campo de cultivo con las producciones agostadas, un campo de cultivo regándose a plena luz del día en verano, o un campo de cultivo con sistema de goteo. También se ha comprobado como en la mayoría de las imágenes no se describe ni contextualiza el territorio desde donde está tomada la fotografía. Las editoriales deberían hacer un esfuerzo por incluir, al menos, a pie de imagen la localización o ámbito cercano donde está tomada. También, respecto a la sequía abundan las fotografías de tierras cuarteadas e incluso de desiertos. Esto se debería mejorar, puesto que la sequía y los paisajes semiáridos o desérticos (se desconoce su localización) poco o nada tienen que ver con la sequía.

A tenor del análisis de estos recursos escolares, se debería tener en cuenta diferentes cuestiones para mejorar la inclusión de imágenes sobre los riesgos naturales. Esto es de suma importancia debido a tres factores: 1) escasa formación y capacitación del profesorado sobre estas temáticas; 2) los estereotipos que se están creando tanto en los docentes como en el alumnado sobre estos fenómenos; y 3) el libro de texto sigue siendo la principal herramienta utilizada en las clases de Ciencias Sociales (Bel et al., 2019). Por tanto, un profesorado que deba tratar estos contenidos que se encuentran fuera de su “confort”, tenderá probablemente al uso y abuso de estos recursos de manera poco adecuada. En cuanto a las posibles inclusiones de mejora de los libros de texto, las editoriales deberían insertar imágenes donde: 1) se pueda observar cómo la acción humana tiene influencia en el riesgo. Es decir, que no sólo se refleje el factor natural ya que en muchas ocasiones el agravante del riesgo es la acción del ser humano; 2) a pesar de que estos fenómenos llevan consigo efectos desastrosos, también se debería transmitir un mensaje de los aspectos positivos de estos riesgos y que tradicionalmente la sociedad ha sabido aprovechar y adaptarse; y 3) explicar el contexto del territorio al que hacen referencia (Figura 4). En este sentido, para el alumnado, sería muy positivo y motivador para su aprendizaje incluir imágenes de estos fenómenos de su entorno más cercano, especialmente para aquellas editoriales que incluyen contenidos regionales y especializados en función de las comunidades autónomas. Esto estaría vinculado con las defendidas propuestas “IOL” (“Imaginación”, “Originalidad” y que se vinculen con el entorno “Local”) (Morote & Olcina, 2021). Con todas estas propuestas se podría presentar una explicación holística de los riesgos naturales en los libros de texto. La Tabla 5 recoge una serie de consejos básicos de utilidad para la enseñanza de los riesgos naturales en el aula en los niveles de Educación Primaria.

Figura 4. Necesidad de una explicación holística de los riesgos naturales a partir de las imágenes en los manuales



Elaboración propia

Tabla 5. Consejos básicos para la enseñanza de los riesgos naturales en Educación Primaria

	Consejos básicos
Trabajo en el aula	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptar la enseñanza de los peligros naturales al contexto local (¿qué peligros son los más importantes en mi localidad, comarca: precipitaciones torrenciales, temperaturas extremas, vientos fuertes, tormentas, etc.). - Adaptar la explicación de los peligros naturales a cada curso de Educación Primaria. Los más frecuentes, los más conocidos en el ámbito local, deben explicarse en todos los cursos; los menos frecuentes o no propios del ámbito local en los cursos más avanzados (3^{er} ciclo). - Apoyar, siempre que se pueda, la explicación en el aula con ejemplos reales ocurridos. - Precisar bien los peligros que dependen de las fuerzas internas de la Tierra (terremotos, volcanes) y los que dependen de la atmósfera (lluvias, sequías, temperaturas extremas, vientos fuertes). - Evitar imágenes y mensajes (titulares de medios de comunicación) catastrofistas. - Manejar guías oficiales (Naciones Unidas) de enseñanza del manejo de catástrofes. - Explicar al alumnado la importancia de convivir con el riesgo y transmitir consejos de actuación en caso de que ocurra un evento natural extremo (lluvias, terremoto, viento fuerte, calor o frío, etc.).
Aprendizaje compartido	<ul style="list-style-type: none"> - Conocer las sensaciones experimentadas por el alumnado ante un peligro natural. - Implicar a las familias en el aprendizaje de los peligros naturales (redacción de algún evento extremo vivido en el ámbito familiar). - Realizar talleres prácticos en los que el alumnado aporte fotografías que pueda tener la familia sobre riadas, temporales, tormentas, etc. - Visitar zonas afectadas por algún evento catastrófico y que el alumnado conozca testimonios de gente afectada.
Mensajes éticos	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicar que la naturaleza hay que conocerla y respetarla en todas sus facetas ordinarias y extraordinarias. - Concienciar al alumnado de que la vida en la Tierra puede suponer, en ocasiones, un peligro para la propia vida humana. - No establecer relaciones directas entre peligros naturales y cambio climático. No todo lo extremo que ocurre es consecuencia directa del cambio climático. En particular, los peligros causados por las fuerzas internas de la Tierra no se producen por el calentamiento global. - Transmitir el mensaje de que algunos peligros atmosféricos se están produciendo con mayor frecuencia ahora que antes. Y en este caso, si puede haber relación con el proceso actual de cambio climático. - Explicar el rol del ser humano en la “construcción” de áreas de riesgo, por malas prácticas (ocupación de zonas de inundación, ocupación de primeras líneas de costa, transformación en regadío por encima de la disponibilidad de agua en un territorio, etc.). - Concienciar que determinados territorios (naciones y globales) son “territorios de riesgo” en el que las sociedades tradicionales han sabido adaptarse o convivir con el riesgo.

Nota: estos consejos pueden adaptarse fácilmente a la Etapa de Educación Secundaria y Bachillerato

Elaboración propia

5. Conclusiones

Los riesgos naturales son contenidos que se deben enseñar en la Educación Primaria. En este trabajo se ha comprobado que es sumamente positivo que se incluyan estos contenidos y, además, de una forma visual a partir de imágenes (principalmente fotografías). Incluir estas imágenes debería ayudar al alumnado a interpretar unos fenómenos (climáticos y geológicos) que son estructurales del territorio español. Caso de las inundaciones y las sequías (los que mayor representación tienen) pero otros que, sin embargo, no tienen una presencia destacada o incluso no se incluyen en estos recursos escolares. Por ejemplo, llama poderosamente la atención, la práctica ausencia de un riesgo geológico de extrema importancia en las Islas Canarias como es el caso del vulcanismo (sólo citado en el manual de 6^o de Bromera). Se trataría de un fenómeno de obli-gada incorporación y tratamiento en las clases como manifiesta su importancia ante la erupción del volcán de Cumbre Vieja en la Isla de la Palma (septiembre de 2021) con la destrucción de miles de viviendas, tierras de cultivo y desalojo de miles de personas. No obstante, es cierto que existe una notable complejidad a la hora de representar determinados riesgos naturales. Es difícil reflejar correctamente un riesgo socio-natural como la sequía en una fotografía, razón por la que suele aparecer la recurrente imagen de suelos cuarteados.

Como limitación de estudio, cabe insistir que el análisis de los manuales no aporta un conocimiento real de lo que se enseña en clase. Pero, al tratarse de los principales recursos manejados en las aulas de Ciencias Sociales, su estudio resulta de notable interés. Un reto de investigación futura constituye analizar el uso que hace el profesorado de estos manuales, examinar los contenidos, recursos y actividades que se incorporan para explicar estos fenómenos, extender a la etapa de Educación Secundaria y Bachillerato (asignatura de Geografía), y revisar estos mismos contenidos, pero en los nuevos libros que ya se están utilizando a partir de la LOMLOE para establecer comparaciones.

Respecto a los riesgos climáticos, su enseñanza y previsible incremento en el contexto de cambio climático requieren de un tratamiento singular en los niveles de enseñanza básicos. Ello viene reforzado a partir de diferentes organismos internacionales (IPCC, 2022; ONU, 2015) e incluso con normativas nacionales (Ley 7/2021 de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética) o regionales (Ley 6/2022 de 5 de diciembre, del cambio climático y la transición ecológica en la Comunidad Valenciana). La enseñanza en los niveles básicos (Educación Primaria, Secundaria y Bachillerato) tiene una misión importante en los próximos años, en el contexto del cambio climático: debe incidir más en la explicación veraz de las consecuencias del cambio climático y de los extremos atmosféricos relacionados, evitando los mensajes extremos, catastróficos, poco válidos cuando se explican procesos a largo plazo. El cambio climático es el principal problema ambiental al que se enfrenta la humanidad en el presente siglo. La educación debe aprovechar la oportunidad que se presenta para transmitir mensajes en los diferentes niveles educativos que trasladen la necesidad de un mundo más igualitario y con valores éticos de respeto al territorio.

Referencias

- Beck, U. (1986). *Risikogesellschaft: Auf dem Weg in eine andere Moderne*. Suhrkamp Verlag.
- Bel, J.C., Colomer, J.C., & Valls, R. (2019). Alfabetización visual y desarrollo del pensamiento histórico: Actividades con imágenes en manuales escolares. *Educación XX1*, 22(1), 353-374. <https://doi.org/10.5944/educxx1.20008>
- Benítez, J.K., Cano, J.A., Fernández, E., & Marchena, C. (2014). *Ciencias Sociales 5*. Grupo Anaya
- Benítez, K., Cano, J.A., Fernández, E., & Marchena, C. (2015). *Ciencias Sociales, 6: Primaria*. Grupo Anaya.
- Bosschaart, A., Van der Schee, J., & Kuiper, W. (2016). Designing a flood-risk education program in the Netherlands. *Journal of Environmental Education*, 47(4), 271-286. <https://doi.org/10.1080/00958964.2015.1130013>
- Caride, J.A. & Meira, P.A. (2019). Educación, ética y cambio climático. *Innovación Educativa*, 29, 61-76. <https://doi.org/10.15304/ie.29.6336>
- Chang, C.H. & Pascua, L. (2016). Singapore students' misconceptions of climate change. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 25(1), 84-96. <https://doi.org/10.1080/10382046.2015.1106206>
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.P., Iglesias, A., Lange, M.A., Lionello, P., Llasat, M.C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M.N., & Xoplaki, E. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8, 972-980. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0299-2>
- Díez-Herrero, A., García, E., Martín, C., & Fuencisla, V. (2021). *A todo riesgo. Convivir con los desastres geológicos cotidianos en Segovia*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Estrella, A. (2020). Educación para la ciudadanía global: Los huertos escolares y los ODS. *Comillas Journal of International Relations*, 19, 91-99. <https://doi.org/10.14422/cir.i19.y2020.007>
- Ferreira, R.N. (2021). Cut-off low and extreme precipitation in eastern Spain: current and future climate. *Atmosphere*, 12(7), 835. <http://dx.doi.org/10.3390/atmos12070835>
- García-Francisco, J., Pardo, P., & Rebollo, L.F. (2009). La desertificación y otros problemas ambientales en los libros de texto de geografía de educación secundaria en España. In F. Pillet, M.C. Cañizares, M.C., & Á. Ruiz (Eds.), *Geografía, territorio y paisaje. El estado de la cuestión: actas del XXI Congreso de Geógrafos Españoles* (pp. 1757-1772). Asociación de Geógrafos Españoles.
- Gary, G., Allred, S., & Lo Giudice, E. (2014). An extension education program to help local governments with flood adaptation. *Journal of Extension*, 52, 4, 4IAW6. <https://doi.org/10.34068/joe.52.04.19>
- Giddens, A. (1977). *El capitalismo y la moderna teoría social*. Labor, reed.
- Gregori, J. & Viu, M. (2014). *Crónica 5. Ciencias Sociales*. Ediciones Bromera.
- Gregori, J. & Viu, M. (2015). *Ciencias sociales 6º*. Ediciones Bromera.
- Grence, T. (2015). *Ciencias Sociales. 5º de Primaria*. Santillana Voramar.
- Grence, T. & Gregori, I. (2015). *Ciencias Sociales 6º*. Ediciones Voramar, Santillana Educación.
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) (2014). *Climate Change 2013 and Climate Change 2014 (3 vols.)*. <http://www.ipcc.ch/>
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) (2022). *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf
- Kurup, P., Levinson, R., & Li., L. (2021). Informed-Decision Regarding Global Warming and Climate Change Among High School Students in the United Kingdom. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 21, 166-185. <https://doi.org/10.1007/s42330-020-00123-5>
- Martín-León, F. (2018). Analizando el concepto de "noche tropical". *Revista del Aficionado a la Meteorología, Tiempo.com*. <https://www.tiempo.com/ram/449791/analizando-el-concepto-de-noche-tropical/>

- Martínez-Medina, R. & López-Fernández, J.A. (2016). La enseñanza de la climatología en los manuales escolares de Ciencias Sociales en Educación Primaria. In R. Sebastián & E. M. Tonda (Eds.), *La investigación e innovación en la enseñanza de la Geografía* (pp. 245-258). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante. <https://doi.org/10.14198/GeoAlicante2015.17>
- Morote, A.F. (2021). La explicación del riesgo de sequía en la Geografía escolar: una exploración desde los manuales escolares de Ciencias Sociales (Educación Primaria). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 88, 1-32. <https://doi.org/10.21138/bage.3047>
- Morote, A.F. & Olcina, J. (2021). Cambio climático y sostenibilidad en la Educación Primaria. Problemática y soluciones que proponen los manuales escolares de Ciencias Sociales. *Sostenibilidad: económica, social y ambiental*, 3, 25-43. <https://doi.org/10.14198/Sostenibilidad2021.3.02>
- Morote, Á.F. & Olcina, J. (2022). El tratamiento de los riesgos naturales en los libros de texto de Ciencias Sociales (Educación Primaria). Una aproximación a las definiciones y problematización de las actividades. *Cuadernos Geográficos*, 61(2), 223-246. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v61i2.24389>
- Morote, A.F. & Olcina, J. (2023). Cambio climático y educación. Una revisión de la documentación oficial. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 69(1), 107-134. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.749>
- Morote, Á.F., Olcina, J., & Hernández, M. (2023). How is flood risk explained in the subject of Geography in Spanish schools? An approach based on Social Science textbooks (Primary Education). *International Research in Geographical and Environmental Education*, 32, 1-17. <https://doi.org/10.1080/10382046.2022.2133955>
- Mudavanhu, C. (2015). The impact of flood disasters on child education in Muzarabani District, Zimbabwe. *Jamba: Journal of Disaster Risk Studies*, 6(1), 138. <https://doi.org/10.4102/jamba.v6i1.138>
- Navarro, M., Moreno, O., & Rivero, A. (2020). El cambio climático en los libros de texto de educación secundaria obligatoria. *Revista mexicana de investigación educativa*, 25(87), 933-955.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2015). *Sustainable Development Goals*. UNDP, Sustainable Development Agenda. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/resources.html>
- Oria, P. (2021). *Está aumentando la frecuencia o la intensidad de las precipitaciones extremas en el Mediterráneo*. *Calendario Meteorológico 2021*. AEMET. <https://aemetblog.es/2021/05/02/esta-aumentando-la-frecuencia-o-la-intensidad-de-las-precipitaciones-extremas-en-el-mediterraneo/>
- Parra, E., Martín, S., Navarro, A., & López, S. (2014). *Ciencias Sociales. Comunitat Valenciana. 5º Primaria*. SM.
- Pastor, F., Valiente J.A., & Khodayar, S. (2020). Warming Mediterranean: 38 Years of Increasing Sea Surface Temperature. *Remote Sens.*, 12(2687), 1-16. <https://doi.org/10.3390/rs12172687>
- Pérez-Morales, A., Gil, S., & Quesada, A. (2021). Do we all stand equally towards the flood? Analysis of social vulnerability in the Spanish Mediterranean coast. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 88, 1-39. <https://doi.org/10.21138/bage.2970>
- Prats, J. (2012). Criterios para la elección del libro de texto de historia. *Histodidáctica*, 70, 7-13.
- Ramos, J.M. & Calonge, G. (2014). Renovación de la didáctica de la Geografía física en segundo de bachillerato: La climatología como ejemplo. *Didáctica Geográfica*, 15, 129-151.
- Real Academia de la Lengua (RAE) (2023a). *Catastrofismo*. <https://dle.rae.es/catastrofismo?m=form>
- Real Academia de la Lengua (RAE) (2023b). *Catástrofe*. <https://dle.rae.es/cat%C3%A1strofe>
- Rodríguez, R., Simón, M.M., & Molina, S. (2017). La Región de Murcia en los manuales escolares de educación secundaria. Una narrativa a la sombra de España y Europa. *Historia y Memoria de la Educación*, 6, 241-277. <https://doi.org/10.5944/hme.6.2017.17133>
- Sáiz, J. (2011). Actividades de libros de texto de Historia, competencias básicas y destrezas cognitivas, una difícil relación: análisis de manuales de 1º y 2º de ESO. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 25, 37-64.

- Santana, D., Morales, A.J., & Henarejos, I. (2021). Educación ambiental y proyectos educativos: Iniciativas escolares de transformación ecosocial. *Iber: Didáctica de las ciencias sociales, geografía e historia*, 102, 20-26.
- Seddighi, H., Sajjadi, H., Yousefzadeh, S., López, M., Vameghi, M., Rafiey, H., & Khankeh, H.R. (2021). Representation of disasters in school textbooks for children with intellectual disabilities in Iran: A qualitative content analysis. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101987>
- Serantes, A. (2015). Como abordan o Cambio Climático os libros de texto da Ensinanza Secundaria Obligatoria na España. *AmbientalMENTEsustentable*, 20, 249-262. <https://doi.org/10.17979/ams.2015.2.20.1609.1603>
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz, M. A., & De Luis, M. (2018). Recent trends reveal decreasing intensity of daily precipitation in Spain. *International Journal of Climatology*, 38, 4211-4224. <https://doi.org/10.1002/joc.5562>
- Shah, A.A., Gong, Z., Muhammad, A., Sun, R., Naqvi, S.A.A., & Arif, M. (2020). Looking through the Lens of schools: Children perception, knowledge, and preparedness of flood disaster risk management in Pakistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101907. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101907>
- Shepardson, D.P. & Hirsch, A.S. (2020). Teaching climate change. What educators should know and can do. *American Educator*, 20, 4-13.
- Tonini, I.M., Claudino, S., & Souto, X.M. (2016). Manuais escolares de Geografia de Brasil, Espanha e Portugal: Quais as inovações didáticas para o ensino de Geografia?. In R. Sebastião & E. M. Tonda (Eds.), *Investigar para Innovar* (pp. 191-205). Limencop. <https://doi.org/10.14198/GeoAlicante2015.64>
- Valls, R. (2007). *Historiografía Escolar Española: Siglos XIX-XXI*. UNED.
- Valls, R. (2008). *La Enseñanza de la Historia y textos escolares*. Ediciones Zorzal.
- Vargas, J., Olcina, J., & Paneque, P. (2022). Cartografía de riesgo de inundación en la planificación territorial para la gestión del riesgo de desastre. Escalas de trabajo y estudios de casos en España. *Revista EURE*, 48(144). <https://doi.org/10.7764/EURE.48.144.10>
- Ward, P.J., Blauhut, V., Bloemendaal, N., Daniell, J. E., de Ruiter, M. C., Duncan, M. J., Emberson, R., Jenkins, S. F., Kirschbaum, D., Kunz, M., Mohr, S., Muis, S., Riddell, G. A., Schäfer, A., Stanley, T., Veldkamp, T. I. E., & Winsemius, H. C. (2020). Review article: Natural hazard risk assessments at the global scale. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 1069-1096. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1069-2020>
- White, G.W. (1974). *Natural hazards, local, national, global*. Oxford University Press.
- Williams, S., McEwen, L.J., & Quinn, N. (2017). As the climate changes: Intergenerational action-based learning in relation to flood education. *The Journal of Environmental Education*, 48(3), 154-171. <https://doi.org/10.1080/00958964.2016.1256261>
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2004). *At risk. Natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. Routledge.
- Zhong, S., Cheng, Q., Zhang, S., Huang, C., & Wang, Z. (2021). An impact assessment of disaster education on children's flood risk perceptions in China: Policy implications for adaptation to climate extremes. *Sci. Total Environ.*, 757, 143761. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143761>
- Zittis, G., Bruggeman, A. & Lelieveld, J. (2021). Revisiting future extreme precipitation trends in the Mediterranean. *Weather and Climate Extremes*, 34, 100380. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100380>

Apuntes de la ecología fluvial de la cuenca del Alto Guadalope en un contexto de conflictividad ambiental y crisis climática

Analysis of the fluvial ecology of the Alto Guadalope basin in a context of environmental conflict and climate crisis

AUTORÍA

Luis del Romero Renau 
Universitat de València, España.

Núria Esteve Roda 
Universitat de València, España.

Antonio Valera Lozano 
Universitat de València, España.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25545>

CITACIÓN

Del Romero Renau, L., Esteve Roda, N., & Valera Lozano, A. (2024). Apuntes de la ecología fluvial de la cuenca del Alto Guadalope en un contexto de conflictividad ambiental y crisis climática. *Investigaciones Geográficas*, (81), 109-129. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25545>

CORRESPONDENCIA

Luis del Romero Renau (Luis.romero@uv.es)

HISTORIA

Recibido: 5 julio 2023
Aceptado: 21 diciembre 2023
Publicado: 26 enero 2024

TÉRMINOS

© Luis del Romero Renau, Núria Esteve Roda y Antonio Valera Lozano

 Este trabajo se publica bajo una licencia [Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resumen

El Maestrazgo y la Sierra de Gúdar en Teruel tienen una gran diversidad de ecosistemas, entre los que destacan, además del bosque de ribera y los ecosistemas acuáticos sobre los que nos centraremos en este trabajo, ecosistemas forestales repartidos en varios pisos bioclimáticos. El objetivo de este trabajo es doble. Por un lado, se pretende evaluar el estado de conservación de uno de los territorios de mayor riqueza natural del sur de Aragón como es el ecosistema fluvial del río Guadalope en su tramo alto, y por otro lado proponer un marco de protección con mayor imperativo legal como es el parque natural, figura que en la actualidad no tiene esta provincia. Para ello, la metodología empleada por un lado consistirá en la consulta de la escasa bibliografía especializada sobre esta zona de estudio, y por otro lado en la determinación de la calidad de los hábitats fluviales a partir de la construcción de dos índices: el QBR sobre calidad del bosque de ribera, y el IHF sobre hábitats fluviales. Los resultados muestran que, pese a que este territorio no tiene en estos momentos ningún marco de protección ambiental más allá de tres monumentos naturales, una ZEPA y una ZEC, reúne valores suficientes como para que sea declarado como parque natural, que sería, además, el primero de este territorio.

Palabras clave: ecosistema fluvial; Teruel; conflictos ambientales; bosque de ribera; espacios naturales protegidos; Maestrazgo.

Abstract

The Maestrazgo and the Sierra de Gúdar in Teruel are made up of a great diversity of ecosystems, among which, in addition to the riparian forest and the aquatic ecosystems on which this study focuses, the forest ecosystems spread over several bioclimatic floors particularly stand out. The objective of this paper is twofold. On the one hand, it seeks to evaluate the state of conservation of one of the territories with the greatest natural wealth in southern Aragon, namely the fluvial ecosystem of the Guadalope River in its upper section, and on the other hand, it proposes a protection framework with greater legal imperative such as that pertaining to natural parks, which this province does not currently have. To do this, the methodology will be based on the consultation of the few specialized bibliographies on this study area, and on the other hand, it will determine the quality of fluvial habitats based on the construction of two indicators: the QBR on quality of the

riparian forest and the IHF on fluvial habitats. The results show that despite the fact that this territory does not currently have any environmental protection framework other than three natural monuments, a ZEPA and a ZEC, it has enough values to be declared a natural park, which would be the first in this area.

Keywords: river ecosystem; Teruel; environmental conflicts; riverside forest; natural protected areas; Maestrazgo.

1. Introducción

La comarca turolense del Maestrazgo es la menos poblada de todas las comarcas de Aragón. Con poco más de 3000 habitantes divididos en 15 municipios (Instituto Aragonés de Estadística [IAEST], 2023), se trata de un auténtico desierto demográfico con apenas 2,6 habitantes/km², también la cifra más baja. El río Guadalope es el segundo afluente más importante por la margen derecha del Ebro tras el río Jalón y el principal eje fluvial articulador de esta comarca. Este curso fluvial posee una importante diversidad de hábitats de flora con casi 700 taxones solo en su tramo medio (Aguilella i Palasí, 1998, 2014) y varios monumentos naturales. Este sistema fluvial a su vez tiene afluentes de gran interés natural como el río Pitarque o el río Cañada y sobre todo el río Bergantes, que también mantiene un elevado nivel de naturalidad ya que se trata prácticamente del único río de la Comunidad Valenciana que no está regulado por embalses y en el que destaca, entre otras cosas, la existencia de varios hábitats de nutria (Jiménez & Palomo, 1998), y que los autores pudieron verificar gracias al avistamiento de dos ejemplares.

Este territorio se ha visto sin embargo recientemente amenazado por dos tipos de proyectos industriales: las canteras de arcillas en los municipios de Seno, Molinos y varias poblaciones del término de Castellote justo en el sector norte de la cuenca, y el proyecto de Clúster Maestrazgo de energías renovables en su extremo sur. El primero consiste en varios proyectos de minas de arcillas en un territorio muy rico en fuentes que surten al Guadalope y a su afluente el Guadalopillo, lo que afectaría no solo al suministro de agua potable, sino a todo el sistema hidrológico de la zona (Marinescu, 2023). Solo el proyecto de mina en Cuevas de Cañart tuvo una oposición prácticamente unánime por parte de la población local, y se enviaron más de 300 alegaciones (Rajadel, 2023).

Por otro lado, a finales de 2022 tuvo luz verde del Ministerio de Transición Ecológica el macroproyecto de energías renovables conocido como el “Clúster del Maestrazgo”. Según la Declaración de Impacto Ambiental, se consideraba ambientalmente compatible ubicar en este territorio de montaña con un elevado grado de naturalidad nada menos que 22 centrales de energía eólica con un total de 123 aerogeneradores y dos centrales de energía fotovoltaica, con más de 100 hectáreas de superficie (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico [MITER], 2022a). A pesar de la escasa población residente en este territorio, el Ministerio recibió casi 500 alegaciones de particulares y de 15 asociaciones, a lo que hay que sumar las consultas efectuadas a 63 administraciones públicas (MITER, 2022a). La mayoría de las alegaciones presentadas coincidieron en señalar que las afecciones ambientales de 123 aerogeneradores serían muy graves sobre comunidades de fauna como el quebrantahuesos o la alondra ricotí, e implicaría la tala de bosque de pinar negro y la destrucción de brezales oromediterráneos (MITER, 2022a).

A todo ello hay que sumar el contexto de crisis climática cada día más evidente tanto a nivel global como en territorios rurales como el Maestrazgo. Por un lado 2022 fue según la AEMET el año más cálido desde el comienzo de la serie histórica en 1961, con nada menos que 35 récords de temperatura diarios en diferentes jornadas (AEMET, 2023; La Vanguardia, 2023). De los diez años más calurosos desde 1961, nueve se han dado en el siglo XXI según esta agencia. Por otro lado, la recurrencia de sequías también aumenta, de forma que las confederaciones hidrográficas, y la del Ebro no es una excepción, han de activar regularmente planes de sequía, y la última entre 2022 y 2023 obligó a adoptar medidas de emergencia en plena primavera (Martín, 2023). El medio ambiente y particularmente los ecosistemas acuáticos y fluviales parecen tener últimamente múltiples amenazas en este territorio. Por ello, el objetivo de este trabajo es doble. Por un lado, se pretende evaluar el estado de conservación de uno de los territorios de mayor riqueza natural del sur de Aragón como es el ecosistema fluvial del río Guadalope en su tramo alto, y por otro lado proponer un marco de protección con mayor imperativo legal y coordinación entre administraciones, no solo a partir de los resultados del análisis precedente, sino también de la experiencia previa en cuanto a los intentos fallidos de declarar un parque natural en esta zona. La razón de delimitar este estudio solamente a la cuenca alta del río Guadalope, concretamente desde su nacimiento en los altos de Sollavientos hasta el pantano de Santolea es porque se trata precisamente del tramo y territorio con menos impactos ambientales y mejores índices de calidad de las aguas y del bosque de ribera (Puebla et al., 2000).

2. Metodología

2.1. Contexto geográfico

El río Guadalope discurre por el Bajo Maestrazgo, con un relieve dominador por las sierras de Molinos, Castellote y Bordón con una altitud media de 1.000 m que están recortadas por el propio río Guadalope en la rama aragonesa del sistema ibérico (Mata-Perelló, 2010). El rasgo geológico fundamental de este sector es el predominio de una gruesa cobertera mesozoica (Calvo et al., 2010) formada durante un largo periodo en el que esta zona funcionó como una profunda cuenca de sedimentación abierta hacia el este y afectada por movimientos de inestabilidad, con elevaciones y hundimientos de su fondo, de manera que el mar se retiró de allí varias veces (Lozano, 2007). Los ejes tectónicos toman una dirección Suroeste-Nordeste, enlazando en los puertos de Beceite con la Cadena Costera Catalana, lo que constituyó un condicionante fundamental en la formación del río que sigue estos mismos ejes. Desde el punto de vista geomorfológico, el río Guadalope discurre por una sucesión de unidades paralelas, dispuestas de noroeste a sureste, que se calca de la orientación de los pliegues alpinos y de la consistencia de los materiales cretácicos que los constituyen (Lozano, 2007).

El río Guadalope y sus afluentes el Pitarque y el Cañada se caracterizan por una compleja geomorfología. En primer lugar, el río Pitarque se forma en el amplio valle de la Rambla de Mal Burgo que aprovecha el eje sinclinal de Fortanete y va acompañado de depósitos detríticos (Calvo et al., 2010). Esta rambla, un poco más al norte ya dentro del término municipal de Pitarque, cambia su nombre por el de río Pitarque, dibuja una serie de meandros encajados y se filtra, desapareciendo en las calizas y dolomías del Cenomaniense-Turonense, para reaparecer luego en una serie de surgencias kársticas en el Nacimiento del río Pitarque (Lozano, 2007). Por su parte el río Cañada nace en la Sierra de la Cañada (1.775 m), que constituye el flanco cretácico oriental del sinclinal de Fortanete, arrasado en cumbres por la superficie de erosión y con un espectacular modelado estructural en su ladera conformada por “chevrons” (Lozano, 2007) recortados por el propio río donde se desarrollan unas interesantes formas de erosión favorecidas por la verticalidad de los estratos jurásicos que forma un interesante congosto a su paso por Cañada (Mata-Perelló & Sanz Balaguer, 2015), hasta su desembocadura en el río Pitarque. Por último, el río Guadalope nace en las alturas de Sollavientos y discurre desde el inicio por el pliegue ibérico de Miravete. Las estructuras de dirección ibérica, descritas como condicionantes de la organización general del relieve en el Alto Maestrazgo, son sustituidas, más allá de Pitarque y Villarlugo, por otras, mucho más complejas, que incluyen fallas cabalgantes y se orientan hacia el ENE (Lozano, 2007). En este sentido, el río Guadalope, a partir de Aliaga cambia de dirección hacia el embalse de Santolea, controlado por las directrices tectónicas ENE. El río se encaja en un profundo cañón para atravesar seguidamente varias cubetas ibéricas marginales (Calvo et al., 2010), hasta su desembocadura en el Ebro.

Desde el punto de vista hidrológico cabe destacar que el Guadalope es el segundo afluente más largo de la margen derecha del río Ebro con una longitud de 160 km y un volumen en régimen natural de 331,88 hm³/año (Confederación Hidrográfica del Ebro [CHE], 1998), de los cuales -una parte importante en su tramo alto los aporta el río Pitarque. Apenas existen datos de aforo o caudal para el Guadalope y sus afluentes pese a la importancia de este río. Tan solo disponemos de datos del SAIH que calcula un caudal medio anual de 0,30 m³/s justo en la desembocadura del Guadalope en el Ebro (SAIH Ebro, 2023). No obstante, se ha de tener en cuenta que, pese a que se trata de un río relativamente corto, se halla regulado por cuatro embalses que retienen una parte importante de su caudal: el embalse de Aliaga, el de Santolea recrecido en los últimos años, el de Calanda y el de Caspe que conjuntamente tienen una capacidad de unos 280 hm³ (CHE, 1998). Respecto al río Cañada no existen datos de ningún tipo, y sobre el Pitarque solo existe una estación de aforo en la localidad de Villarlugo con una sola magnitud de seguimiento, la altura de caudal de 1,28 m (SAIH Ebro, 2023). Dentro de la compleja red fluvial del Ebro el sistema del Guadalope guarda en cuanto a caudal y extensión unos parámetros bastante discretos, pero es de destacar gracias al clima mediterráneo de montaña que domina el Alto Maestrazgo con lluvias relativamente abundantes, que se trata de un río con un caudal constante en comparación con otras cuencas fluviales vecinas, mucho más afectadas por el estiaje de verano del clima mediterráneo, y por el sustrato calizo propenso a la infiltración.

Las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas descritas anteriormente, a las que habría que añadir las condiciones climáticas de alta montaña en la cabecera del río, son factores explicativos fundamentales junto con la acción antrópica, de la variada flora y fauna de este río en la que se mezclan especies norteñas del Pirineo con las propias de las sierras mediterráneas (González Cano, 2007). Como conjunto junto con la Sierra de Javalambre, se trata de uno de los territorios con mayor diversidad florística de toda la Cordillera Ibérica, ya que se han catalogado más de 2.000 taxones de plantas vasculares (Mateo Sanz et

al, 2013). Una de las primeras particularidades que tiene la cuenca del Guadalupe es la presencia de suelos formados por roca arenisca, con una impermeabilidad del sustrato que favorece la retención de agua, fenómeno inusual en zonas calizas donde las aguas se infiltran en cavidades kársticas (González Cano, 2007). Así, en las cabeceras de los ríos Guadalupe y Sollavientos, son los sauces blancos (*Salix alba*) y la sarga negra (*S. atrocinera*), las especies más frecuentes, subiendo hasta los 1.600 metros. Aguas abajo domina el álamo negro (*Populus nigra*), acompañado de otras sargas (*Salix eleagnos* y *S. purpurea*); junto a éstas abundan zarzas (*Rubus ulmifolius*), espino albar y rosales (*Rosa canina*). En cotas inferiores a los 1.000 metros comienzan a ser frecuentes fresnos (*Fraxinus angustifolia*), cornejos (*Cornus sanguinea*) y trepadoras (*Clematis vitalba* y *Hedera helix*) (González Cano, 2007).

En los estrechos del Guadalupe el bosque de ribera aumenta su complejidad. En zonas de umbría se añaden especies propias de zonas más húmedas como: avellanos (*Corylus avellana*), tejos (*Taxus baccata*), olmos (*Ulmus minor*) o el mencionado tilo (*Tilia platyphyllos*). En la Hoz Baja el río Guadalupe ya acoge otras plantas mediterráneas de soto como el tamariz (*Tamarix gallica*) o el durillo (*Viburnum tinus*) que se mezclan con flores montañas como el *Geranium robertianum* (González Cano, 2007). En los ríos estudiados dos especies merecen especial mención en el bosque de ribera en las cuencas altas. La primera de ellas es la presencia de bosquetes de acebo (*Ilex aquifolium*) constatada en el trabajo de campo de esta investigación en los estrechos del Guadalupe, así como en el río Cañada. El propio Gobierno de Aragón considera el bosque de acebo como un hábitat prioritario de conservación (Departamento de Agricultura, 2011) y solo cita su presencia en el Sistema Ibérico en el entorno del Moncayo. En segundo lugar, destaca la presencia de olmo de montaña (*Ulmus glabra*) en el río Pitarque, una especie vulnerable según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN] y que según Rossignoli & Génova (2003), solo se encuentran en el Maestrazgo dentro de toda la provincia de Teruel formando una comunidad bastante aislada, recogido en el catálogo florístico de Mateo Sanz (1990), y corroborado por observación de campo.

Además de esta vegetación, la provincia de Teruel es especialmente rica en géneros y especies de orquídeas silvestres, ya que comprende un 58,42% de las especies y un 68% de los géneros presentes en la flora ibérica (Gamarra Gamarra & Ortúñez Rubio, 2007). Y dentro de la provincia, justamente el Maestrazgo y Gúdar es el área de toda la provincia con más especies por cuadrícula (Gamarra Gamarra & Ortúñez Rubio, 2007). De las especies de orquídeas destaca la presencia de *Goodyera repens*, una orquídea de distribución circumboreal presente en el Pirineo y que en la Sierra de Guara tenía su límite meridional hasta que fue identificada en varios barrancos de la Sierra de Gúdar y Maestrazgo (Fabregat Lluca y López Udias, 1993). Según estos autores la presencia de esta especie en el Maestrazgo, primera cita ibérica extrapirenaica, supone una sorprendente ampliación de su área peninsular, y debe interpretarse, al igual que otras poblaciones europeas meridionales como un relicto del clima postglacial. Solo con este breve análisis ya habría justificaciones de peso para proponer un marco de protección ambiental para estos ríos.

Además de la flora, destaca en el río Guadalupe una fauna muy variada y bastante bien conservada. Solo en el municipio de Allepuz en cuyo límite septentrional se halla la cabecera del Guadalupe se han catalogado 73 especies de vertebrados de los cuales 3 son anfibios, 6 reptiles, 54 aves y 10 mamíferos (Longares et al., 2017). De este conjunto, ocho especies de aves observadas se encuentran incluidas en el Anexo I de la Directiva Aves (Directiva 2009/147/CE) y presentan una tendencia decreciente 30 de las 73 especies observadas (Longares et al., 2017). También destaca en esta investigación la baja riqueza específica de fauna existente en 2017, que contrasta con la que existía décadas atrás según los testimonios de vecinos (Longares et al., 2017).

Algunos mamíferos son claramente abundantes tanto en la cercanía del río como en los bosques más o menos alejados de los núcleos urbanos, como el jabalí (*Sus scrofa*), el zorro (*Vulpes vulpes*), la garduña (*Martes foina*), el tejón (*Meles meles*), el gato montés (*Felis silvestris*) o la gineta (*Genetta genetta*), así como la nutria (*Lutra lutra*). La nutria tiene una presencia continua en el río Guadalupe, ha sido observada directamente por los autores de este trabajo en la cercanía del Latonar en el tramo medio del río, y además forma parte del Listado de Especies Amenazadas de Aragón. Mención especial entre la avifauna merece el quebrantahuesos (*Gypaetus barbatus*) históricamente presente en el Maestrazgo y que se empezó a reintroducir exitosamente en la zona. No obstante, a mediados de 2023 fue una noticia la paralización por primera vez en España del plan de reintroducción en el Maestrazgo de esta especie en peligro de extinción según el Listado de especies amenazadas de Aragón (Gobierno de Aragón, 2022) precisamente por los proyectos de macroparques eólicos del Clúster del Maestrazgo (Planelles, 2023). Dentro de los cauces de los ríos destaca la presencia de poblaciones de trucha autóctona (*Salmo trutta*), así como de cangrejo de río (*Autopotamobius pallipes*), especie también incluida en el Listado de Especies Amenazadas de Aragón. A todo esto, hay que añadir la

existencia de una importante biodiversidad de insectos, mariposas, quirópteros, reptiles y anfibios muy poco estudiada en el Maestrazgo y en general en Teruel.

Más allá de la biodiversidad, el alto Guadalope, al igual que el resto de los cursos fluviales de la zona y por extensión todo el territorio del Maestrazgo y de la Sierra de Gúdar tienen en la actualidad una muy baja densidad de población, si bien esto no ha sido así siempre. Como territorio montañoso de masías, el Maestrazgo ha tenido una importante actividad económica sobre todo basada en la ganadería lanar, y que en el caso del Guadalope se ha manifestado en un importante aprovechamiento de sus aguas para mover molinos harineros y batanes desde la edad media, y desde la edad moderna hasta hace pocas décadas fábricas textiles, de papel y más recientemente de luz. Una treintena de ingenios hidráulicos ha llegado a haber junto a las aguas del Guadalope, Pitarque y Cañada, 14 en el Guadalope en la zona de estudio, 12 en el Pitarque y 4 en el Cañada (Del Romero, 2018), hoy prácticamente todos cerrados o en ruinas. Todos estos aprovechamientos, lejos de constituir amenazas graves sobre el ecosistema ambiental del Guadalope, otorgan un importante valor patrimonial que hoy en día apenas disfruta de protección. Con ello no se quiere afirmar que la acción antrópica no esté presente en el área de estudio, sino que ésta se circunscribe como se verá a continuación, a lugares muy concretos. Cuatro son las principales afecciones ambientales que padece el río Guadalope y sus afluentes en el curso alto, además de las mencionadas amenazas de minas de arcillas y proyectos de renovables que podría afectar a este ecosistema. La primera de ellas sin duda es la presencia de dos presas, la de la Central Térmica de la Aldehuela y la de Santolea recrecida en años recientes. La primera supone un foco de contaminación que se comentará más adelante, y el segundo una alteración notable de toda la morfología fluvial, razón por la cual este estudio solo aborda la cuenca fluvial aguas arriba. La segunda de ellas, ya documentada en estudios sobre contaminación fisicoquímica de las aguas fluviales, es la existencia de vertidos sin depurar o con una depuración deficiente en varios puntos (Puebla et al., 2000). La tercera de ellas es la existencia de una importante carga ganadera bovina en algunos de los valles, lo que ocasiona problemas de contaminación en lugares puntuales y la cuarta, sobre todo visible en el río Pitarque, es el aprovechamiento turístico del nacimiento del río Pitarque, donde se han detectado a lo largo del trabajo de campo varios puntos con vertidos de residuos sólidos junto al cauce.

2.2. Índices de calidad en ecología fluvial

Los ecosistemas fluviales son sin duda uno de los sistemas naturales más amenazados del mundo, sobre todo debido a cambios en el uso del suelo, en el clima, en los ciclos hidrológicos y en la biodiversidad como resultado de la acción humana (Sabater & Stevenson, 2010). Se trata además de un conjunto de ecosistemas sensible y escaso, ya que las láminas de agua dulce continentales como son ríos y lagos tan solo suponen el 0,006% del agua dulce existente en la Tierra (Likens, 2010), y se trata de ecosistemas frecuentemente maltratados, vulnerables y frágiles. En la actualidad, son escasos por no decir inexistentes los cursos fluviales que no sufren algún tipo de afección ambiental ocasionada por el ser humano, y aumentada por los efectos del cambio climático. Según Madhaw et al. (2022), las afecciones ambientales más comunes en los ríos del mundo son la contaminación química por aporte de metales pesados, nutrientes provocando procesos de eutrofización, y otros componentes químicos y farmacéuticos. Por esta razón los ríos son sin duda en todo el mundo un ecosistema crítico a proteger y conservar.

La caracterización ecológica de un río se basa según Elosegui y Sabater (2009) en su estructura y su funcionamiento. La estructura de un ecosistema fluvial se puede definir por las características del medio abiótico que forman el escenario donde se desarrollan una serie de comunidades de organismos que constituyen sus actores principales. Por su parte por funcionamiento se entiende el conjunto de procesos determinados tanto por el medio abiótico como por los organismos. La ecología fluvial se caracteriza por tanto por la forma y dimensiones del cauce, la calidad química del agua, la diversidad de hábitats y las distintas comunidades biológicas que se establecen en los mismos. La biota presente en un ecosistema fluvial es muy heterogénea: microorganismos autótrofos y heterótrofos, invertebrados, peces, vertebrados y vegetación terrestre y acuática (Elosegui & Sabaté, 2009). Este trabajo tan solo aborda con las dos metodologías descritas a continuación, algunos componentes básicos tanto de la biota, como de la geomorfología fluvial, dejando de lado componentes fundamentales de la ecología fluvial del Guadalope, imposibles de incluir en un artículo científico y que requeriría de técnicas y análisis de laboratorio mucho más complejas. No obstante, como se ha señalado anteriormente, el objetivo no es realizar una caracterización exhaustiva de la ecología fluvial del río Guadalope, sino tan solo mostrar unas pinceladas sobre su estado de conservación, para abordar posibles mecanismos de gestión que aseguren su protección.

Como se ha comentado anteriormente, el Maestrazgo y la Sierra de Gúdar tienen una gran diversidad de ecosistemas, entre los que destacan, además del bosque de ribera y los ecosistemas acuáticos sobre los que nos centraremos en este trabajo, ecosistemas forestales repartidos en varios pisos bioclimáticos superando los 2.000 metros en el pico Peñarroya hasta pocos centenares de metros de altura en el norte de la comarca del Maestrazgo que forma parte del Bajo Aragón. De estos ecosistemas se escoge como objeto de estudio el de ribera porque un análisis más amplio sería difícilmente abarcable en un artículo. Por lo tanto, se ha realizado un análisis de la calidad ambiental del río Guadalupe en su cuenca alta y media incluyendo sus principales afluentes el río Pitarque y el río Cañada. El otro gran afluente que es el río Bergantes se escapa de esta zona de estudio, ya que desemboca en el tramo bajo del Guadalupe. Se ha escogido estos tres ríos por ser los más caudalosos de la cuenca y porque la metodología escogida de análisis mediante puntos de control no es aplicable a ramblas estacionales sin una adaptación importante de las variables de estudio.

Se han escogido dos metodologías de estudio: una sobre calidad del bosque de ribera (índice QBR) y una segunda sobre hábitats fluviales (índice IHF). La primera de ellas es uno de los índices recogidos por el Real Decreto 817/2015 por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental (Ministerio de Agricultura, 2015). El segundo índice permite evaluar la complejidad estructural del hábitat de los ríos mediterráneos, registrando la variación natural espacial existente entre tipos de ríos mediterráneos, y la dinámica temporal de los componentes del hábitat de estos sistemas (Pardo et al., 2002). En el actual ciclo de planificación hidrológica 2021-2027 se incorporan diversos índices para evaluar el estado ecológico de los ríos como el IBMWP que valora la composición, abundancia y estructura de la fauna bentónica de invertebrados, parámetros químicos como las condiciones de oxigenación de las aguas o el pH o índices de calidad hidromorfológica como el ICAH que valora el caudal e hidrodinámica del flujo de las aguas (MITER, 2021). Los índices aquí estudiados son por lo tanto insuficientes para poder valorar el estado ecológico de las aguas, si bien es cierto que son interesantes por su elaboración relativamente sencilla sin necesidad de emplear numeroso instrumental de campo. Esta circunstancia ha resultado fundamental para poder realizar un trabajo de campo en una red fluvial frecuentemente encañonada e inaccesible, hasta el punto de que algunos tramos fluviales han requerido de más de cinco horas de marcha e incluso de técnicas de escalada para acceder a ellos.

Tabla 1. Variables estudiadas en los índices IHF y QBR

Índice IHF	Variables	Índice QBR	Variables
Morfología fluvial	Inclusión en rápidos y sedimentación en pozas	Grado de cubierta de la zona de ribera	% de cobertura vegetal en zona de ribera
Frecuencia de rápidos	Relación entre distancia de rápidos y anchura de cauce	Conectividad del bosque de ribera	% de conectividad entre bosque de ribera y ecosistema forestal
Composición del substrato	% de bloques, cantos, gravas limos y arcillas	Calidad de la cubierta	Número de especies autóctonas de árboles en función del tipo geomorfológico de ribera y disposición de las comunidades en franjas longitudinales
Regímenes de velocidad y profundidad	Diversidad de regímenes en un mismo tramo: lento-profundo; lento-somero; rápido-profundo y rápido-somero	Estructura de la cubierta	% de cubierta arbórea y arbustiva en parcela; % de concentración de helófilos en orilla y linealidad de la cubierta
Porcentaje de sombra en cauce	% de cauce expuesto a sombreado con ventanas	Naturalidad del canal fluvial	Grado de modificación antrópica del cauce.
Troncos, raíces y ramas	% de hojarasca; presencia de troncos y ramas; raíces expuestas y diques naturales en tramo estudiado		
Cobertura y tipo de vegetación acuática	% de locon, briófitos, pecton, fanerógamas y charales		

Elaboración propia

El primer índice se divide en cinco variables y el segundo sobre hábitats fluviales en siete. Se realizó un trabajo de campo de análisis de tramos de ríos equidistantes desde el nacimiento del río hasta su desembocadura,

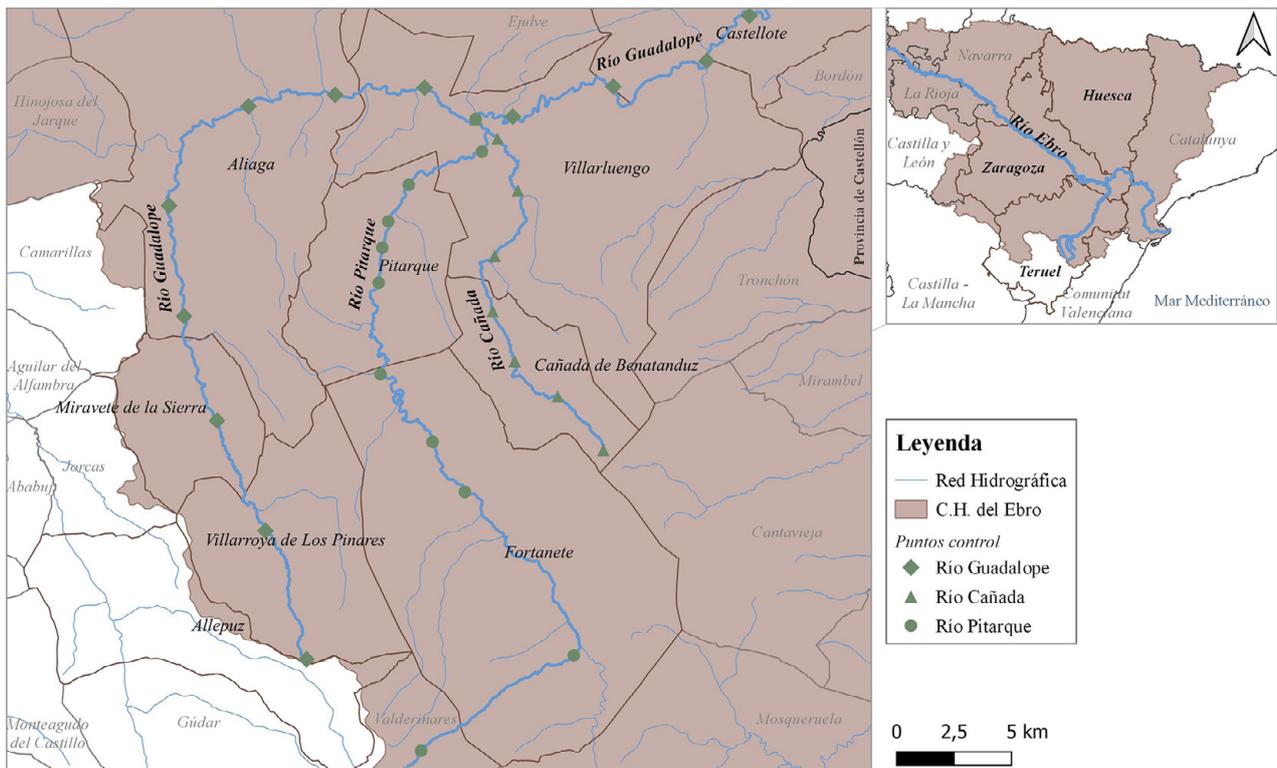
y en el caso del propio río Guadalupe hasta el embalse de Santolea que es la primera gran obra artificial en este cauce. Los dos índices se valoran mediante una escala de cinco categorías que va de muy deficiente a muy bueno según la puntuación obtenida que va de cero a 100. Cada punto de control se realizó sobre un tramo de río de cincuenta metros, partiendo desde el punto inicial situado en el nacimiento siempre que fue posible, de forma que en total se monitorizaron 14 puntos para el río Guadalupe, 11 para el Pitarque y 8 para El Cañada, en total 33 puntos para elaborar una cartografía sobre el índice QBR y otra sobre el índice IHF de esta cuenca fluvial. En la tabla 1 se pueden observar las variables estudiadas por cada índice.

La metodología de campo se realizó en base a HIDRI, el protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos de la Agencia Catalana del Agua a partir de parcelas de 25x25m delimitadas con cinta métrica de 30 metros y se corrigió para el caso del índice QBR con los valores y criterios establecidos por el Real Decreto 817/2015. En el caso del índice IHF, las variables de estudio se centran sobre todo en la geomorfología fluvial y el tipo de bosque de ribera existente según su grado de naturalidad, con especial mención a una buena distribución de musgos y vegetación subacuática según porcentajes de ocupación para detectar posibles problemas de eutrofización. Por su parte el índice QBR se refiere a la calidad del bosque de ribera y es complementario del anterior. Toda esta información se contrastó a su vez con la única investigación que se ha efectuado sobre la zona que se centra en calidad química y biológica del río Guadalupe realizada por Puebla et al. (2000), a partir de 17 puntos de control en el que se realizaron análisis de calidad de las aguas. A partir de toda esta información se realizó una cartografía de índice de calidad global del bosque de ribera y del cauce fluvial. En el apartado siguiente se analiza con detalle los resultados de aplicar los índices de calidad de hábitat fluvial para determinar la calidad ecológica del Alto Guadalupe por tramos.

3. Resultados

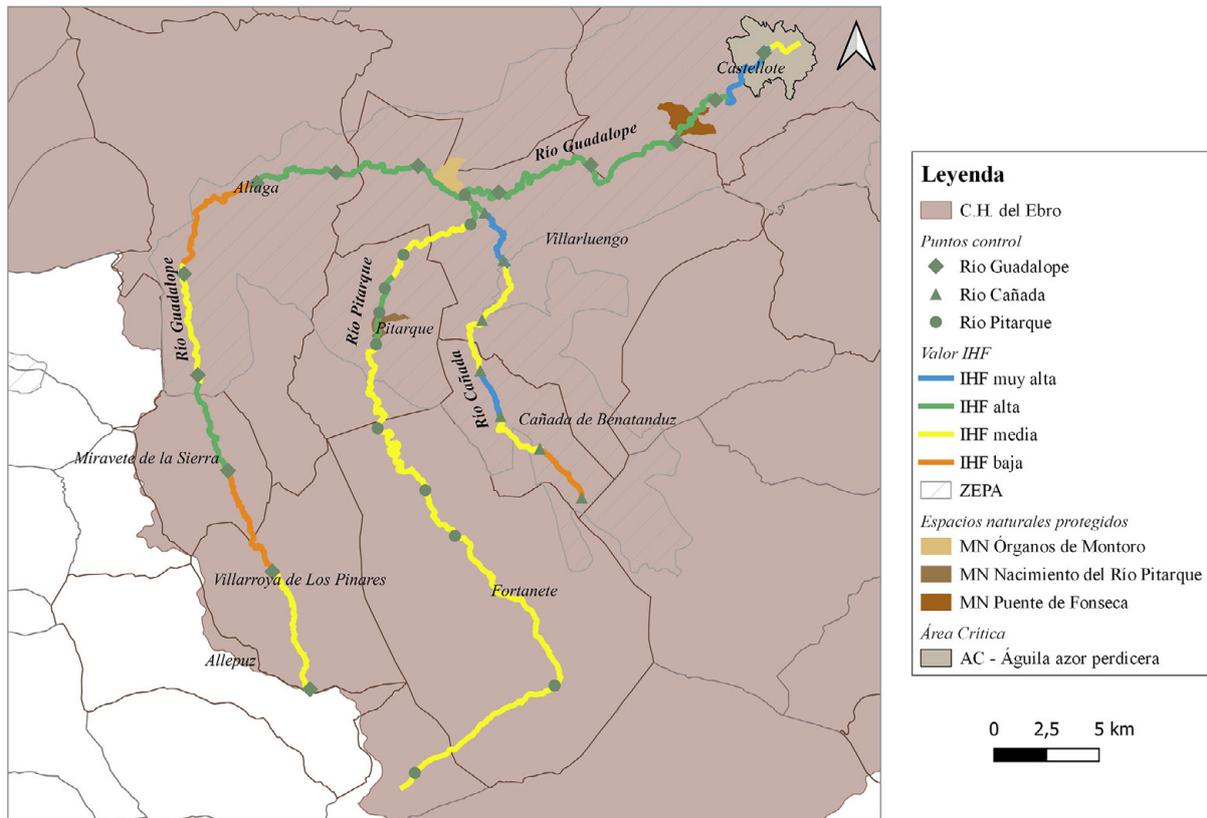
Las siguientes figuras muestran en primer lugar la localización del curso alto del río Guadalupe y sus dos afluentes el Pitarque y el Cañada, así como los puntos de control donde se han elaborado las fichas de campo (Figura 1). Seguidamente se muestra el resultado del índice IHF por tramos de forma que el índice obtenido en el nacimiento se extrapola aguas abajo hasta el siguiente punto y así sucesivamente hasta la desembocadura o final del tramo estudiado. La escala de colores y valores de cada índice corresponde con la metodología seguida (Agencia Catalana del Agua [ACA], 2006).

Figura 1. Localización del Alto Guadalupe y sus afluentes los ríos Pitarque y Cañada



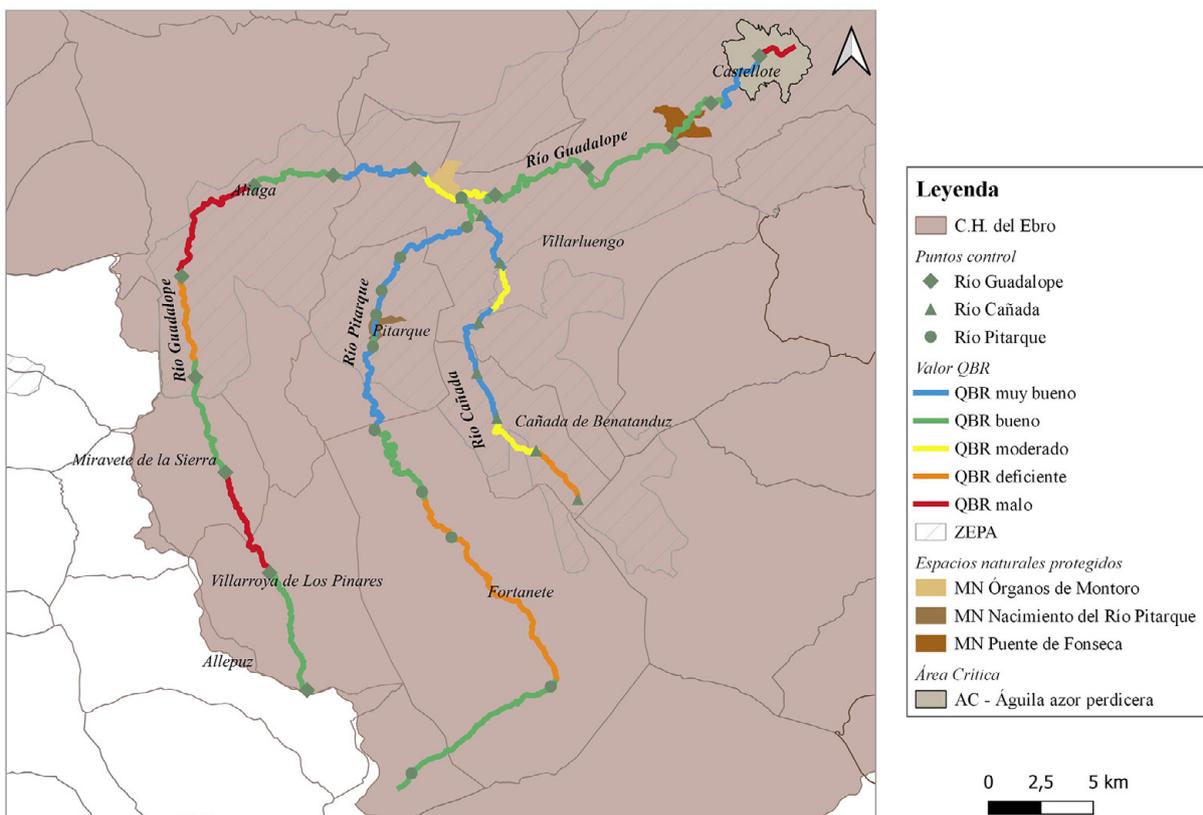
Elaboración propia

Figura 2. Índice de Hábitat Fluvial según metodología de ACA (2006)



Elaboración propia

Figura 3. Índice de Calidad del Bosque de Ribera según metodología de ACA (2006)



Elaboración propia

3.1. El Alto Guadalope

La presencia del macizo montañoso de la Sierra de Gúdar con su orientación ibérica y su cumbre de más de 2.000 m en el caso del pico Peñarroya, por un lado, supone por las frecuentes nevadas un importante aporte hídrico, y por el otro una barrera que obliga a los cursos fluviales a dirigirse hacia el sur o hacia el norte, marcando así la divisoria de aguas entre la cuenca del Mijares y del Guadalope, o lo que es lo mismo, entre el organismo de cuenca de la Confederación Hidrográfica del Ebro y la del Júcar. El río Guadalope nace fruto de la unión de varios barrancos y fuentes como el Morrón o La Boneta que nacen a unos 1.600 m de altura en la divisoria con el río Sollavientos. Desde el mismo nacimiento la presencia humana es evidente por la presencia de pastos, masías, alguna que otra tierra de cultivo y corrales. El nacimiento propiamente dicho en la Partida Alta se encuentra en una vaguada escalonada por bancales con abundante vegetación gracias a la presencia de un hilo perenne de agua rodeado de chopo cabecero.

Figura 4. Nacimiento del río Guadalope



Fotografía de los autores

El primer tramo del río Guadalope hasta Villarroya de los Pinares tiene una calidad de bosque de ribera y de hábitat fluvial de moderada a buena. Al haber un curso de agua perenne y de aguas cristalinas en un curso fluvial con zonas de umbría no expuestas a los vientos, hay una tupida vegetación con fresa salvaje, aguileña alpina o *Geranium Pyrenaicum* en el estrato herbáceo y rosál silvestre, avellano y chopo cabecero y álamo blanco en el estrato arbóreo y arbustivo. La calidad disminuye poco antes de llegar al Villarroya, ya que el bosque de ribera desaparece para dar paso a plantaciones de chopo y tierras de labor. Por esta razón en este tramo hasta Miravete los índices de calidad son bajos, aunque la calidad de las aguas es buena. Poco antes de llegar a Miravete hay un aumento significativo de la calidad del bosque de ribera y del hábitat fluvial. En este tramo conviven pastizales, muchos de ellos en estado de abandono, con tierras de labor, el típico bosque de ribera presidido por chopo cabecero, y un curso fluvial que ya ha aumentado su caudal y que tiene un tramo en sombra, pero con claros. Toda esta diversidad de ambientes permite la presencia del *Delphidium orientale* o conejito de jardín, *Trifolium medium* y *Alyssum alyssoides* en los antiguos pastizales adyacentes al río. Como bosque de ribera, además del mencionado chopo cabecero se encuentra espino albar, madreselva y el *Viburnum Lantana*. También en este tramo aparece por primera vez diferentes especies de vegetación subacuática como la *Veronica beccamunga* y la *Veronica anagallis*, y especialmente el Berro de Agua o *Nasturtium officinale*, una planta subacuática con propiedades medicinales cuya presencia indica que se trata de un tramo con una alta calidad de las aguas.

Esta calidad se mantiene hasta que el río penetra en el término municipal de Aliaga, concretamente a partir de la partida de Las Tamboreras. La calidad de su bosque de ribera y de los hábitats de nuevo desciende por la destrucción de varios tramos de bosque de ribera por la presencia de campos de cultivo, y por la afección de las vías de comunicación. Esta situación vuelve a darse una vez se deja el núcleo urbano de Aliaga hasta la Hoz Mala. Todo este tramo es el que obtiene peores datos de IHF (45/100), y sobre todo de QBR (15/100).

Esta situación se debe al alto grado de antropización del cauce fluvial y sus riberas en este tramo. Vías de comunicación como la carretera TE-V-8008 discurre en algunos tramos a muy escasa distancia del lecho fluvial y una de las riberas está por lo tanto impermeabilizada con cemento. A esto hay que añadir la deficiente calidad de las aguas sobre todo desde el Barrio de La Aldehuela, ya que este núcleo urbano carece de depuradora y vierte sus aguas residuales al río tan solo con un tratamiento primario de filtros. De todo el Guadalupe alto este es quizás el punto de mayor afección ambiental. La central térmica de Aliaga, principal afección ambiental de este tramo de río se cerró en 1982 (Del Romero et al., 2021) y desde entonces no hay ningún mantenimiento del embalse construido para la refrigeración de la central térmica que presenta un estado de conservación precario, que tiene un alto nivel de colmatación y unas aguas superficiales con un alto nivel de turbidez y eutrofización. En este punto donde se detiene casi por completo el caudal del río, se concentra materia orgánica de diferentes orígenes de modo que la calidad ambiental general y del bosque de ribera es deficiente.

No obstante, la situación cambia drásticamente cuando el río penetra en una serie de cañones y desfiladeros como la Hoz Mala, Boca Infierno, Valloretica y Valloré hasta la población de Montoro. Se trata del tramo de río más espectacular no solo por la buena calidad del bosque de ribera y de los hábitats, sino por el paisaje y la presencia de fauna, en especial la cabra montesa, el corzo y una nutrida colonia de buitre leonado. En la Hoz Mala las condiciones microclimáticas del interior del cañón permiten la existencia de importantes bosques de acebo, muy poco comunes en la Cordillera Ibérica turolense, así como de tilos, *Viburnum lantana* y arces. Además, cabe destacar la presencia de enebros y sabinas en las áreas más soleadas. Los estrechos de Valloré son especialmente interesantes por la variedad de vegetación de ribera, donde destaca el tejo y el acebo en zonas de umbría, pero también un variado conjunto de especies vegetales de ribera como la Hierba de San Juan o *Hypericum tetrapterum*, la *Scrophularia auriculata*, el *Hypericum hirsutum*, la hierba de San Antonio o *Epilobium hirsutum*, el *Helosciadium nodiflorum*, el *Eupatorium cannabinum* y la menta de lobo o *Lycopus europaeus*. Gracias a la abundancia de surgencias y pequeñas cascadas aparece el culantrillo de pozo y la presencia de plantas subacuáticas como la *Groenlandia densa* y el *Lythrum salicaria* supone un interesante hábitat para peces, anfibios y reptiles. En el trabajo de campo se pudo observar varios ejemplares de sapo partero (*Alytes obstetricans*) y culebra viperina (*Natrix maura*). Por esta razón este tramo ha sido catalogado con el índice QBR más alto de todo el Alto Guadalupe.

Figura 5. a) Culebra viperina en una comunidad de *Groenlandia densa* en Valloré
b) Cascada y rápidos cerca del Puente Natural de La Fonseca



Fotografías de los autores

A partir del núcleo de Montoro el río se abre y el paisaje se homogeneiza. Vuelve a aparecer el bosque de ribera presidido por el chopo cabecero con varias especies de sauce, y en los rincones más soleados aparece el fresno. La confluencia con el río Pitarque, que a su vez ha recibido las aguas del río Cañada, suponen un aporte de caudal de agua mayor y de mejor calidad que la que fluye por el Guadalupe. A partir de esta confluencia y del Puente del Vado, sin duda una de las obras de arquitectura más notables de todo el curso del Guadalupe, el río discurre por la Sierra de la Garrucha en su tramo más salvaje, desde el punto de vista de la práctica ausencia de usos y aprovechamientos. Tan solo se observa de vez en cuando un pequeño pastizal estacional para ganadería bovina y alguna senda. Los índices de IHF y QBR son aquí altos por la presencia de un bosque de ribera generalmente bien desarrollado dentro de los límites que impone la orografía. El otro rasgo distintivo

es que la vegetación mediterránea ya es dominante, y en la vegetación de ribera domina, además del chopo cabecero, el fresno y el sauce y puntualmente alguna higuera. Aunque no se observa tanta variedad de fauna como en el tramo precedente, sí destaca la presencia de rapaces diurnas y de avifauna forestal. El tramo final hasta el pantano de Santolea sigue presentando valores altos de QBR e IHF. Cabe destacar que, en este tramo, pese a que sí que tiene poblamiento de masías y algún que otro pastizal y bancal labrado, también tiene tramos de gran calidad ambiental como el Monumento Natural del Puente de La Fonseca, una toba travertínica horadada por el río Guadalupe originando un túnel. Desde el punto de vista patrimonial, destacan varios ejemplos de patrimonio hidráulico como las fábricas de papel cercanos a este puente natural. En todo este tramo la calidad del bosque de ribera y de los hábitats no es inferior al tramo anterior sin prácticamente acción antrópica. El tramo final hasta el pantano de Santolea sigue teniendo unos índices altos, ya que discurre durante varios kilómetros atravesando la sierra de la Garrucha prácticamente inaccesible y sin afecciones de ningún tipo, pero va disminuyendo paulatinamente a partir de La Algecira porque se pierde la naturalidad del bosque de ribera, convirtiéndose en plantaciones de chopos, áreas de cultivo, pastizales o áreas sin vegetación. Aunque en tramos posteriores el Guadalupe recupera una cierta calidad ambiental, ésta se ve mermada por problemas de calidad de las aguas, presencia de algunas especies invasoras y degradación del bosque de ribera y del paisaje fluvial por usos agrícolas principalmente.

Tabla 2. Valores obtenidos mediante el cálculo del IHF y QBR para el río Guadalupe

	Tramo	IHF	QBR
Río Guadalupe	I	Media (68)	Bueno (75)
	II	Baja (40)	Malo (20)
	III	Alta (77)	Bueno (75)
	IV	Media (58)	Deficiente (35)
	V	Baja (45)	Malo (15)
	VI	Alta (80)	Bueno (90)
	VII	Alta (86)	Muy bueno (100)
	VIII	Alta (75)	Moderado (70)
	IX	Alta (87)	Bueno (75)
	X	Alta (87)	Bueno (75)
	XI	Alta (78)	Bueno (85)
	XII	Alta (70)	Bueno (75)
	XIII	Muy alta (100)	Muy bueno (100)
	XIV	Media (70)	Malo (25)

Elaboración propia

3.2. El río Pitarque

Durante gran parte de su recorrido, el río Pitarque es conocido como Rambla de Malburgo y es un cauce seco o rambla de carácter mediterráneo donde solo discurre el agua en días de lluvias. Este curso fluvial comienza a más de 1.800 metros de altura en las praderías al norte de la Sierra del Monegro. Al igual que el río Guadalupe, la altura en el que se encuentran sus fuentes, sobre un sustrato rocoso relativamente impermeable, y un clima que favorece una precipitación alta y parcialmente en forma de nieve, favorece que el tramo inicial disponga de agua casi todo el año, y abunden las charcas estacionales por la escasa pendiente, como por ejemplo en la Fuente del Rodeo.

La rambla de Malburgo disminuye poco a poco su pendiente lo que favorece su transformación en una rambla más o menos ancha con predominio de bloques y cantos y muy escasa vegetación de ribera, ya que está ocupada por pastos. Una vez supera el pueblo de Fortanete comienza a encajarse y a meandrizarse. La incisión del río sobre rocas calizas y la mayor presencia de bosque de pino laricio o negral a medida que la rambla progresa hacia el norte explica que vaya poco a poco aumentando su calidad ambiental. Aunque por la ausencia de un caudal perenne, no hay apenas vegetación de ribera y mucho menos fauna o flora acuática, es de destacar en algunos de sus meandros la presencia de numerosos ejemplares de moluscos y de anfibios en charcas estacionales, así como de mariposas. En el largo de tramo que hay desde Fortanete hasta los Ojos del río Pitarque la presencia humana se limita a alguna masía o paridera normalmente deshabitada o aban-

donada, y a algún que otro pastizal estacional. La rambla, como se puede observar en la figura 5b, atraviesa largos tramos de bosque de pinar y su morfología recuerda a la de una rambla típica de zonas mediterráneas.

Figura 6. a) Fuente del Rodeo. b) Rambla de Mal Burgo al norte del término de Fortanete



Fotografías de los autores

El cambio radical sucede una vez la rambla de Malburgo se convierte en el río Pitarque en el Monumento Natural del nacimiento del río Pitarque. El IHF alcanza en este tramo valores máximos y el QBR aumenta hasta alcanzar desde el nacimiento hasta la salida del pueblo de Pitarque, valores muy altos. En los alrededores del nacimiento el río atraviesa un bosque de ribera complejo poblado de sauces, avellanos y chopos, algún que otro tejo y olmo. Fuera de los puntos de mayor afluencia turística, es fácil observar en sus limpias aguas anfibios, serpientes y una variada representación de musgos y vegetación subacuática. No obstante, en las jornadas de trabajo de campo se advirtieron dos afecciones importantes: la presencia de espumas en el agua desde la misma surgencia, lo que hace sospechar que existe alguna fuente de contaminación que está afectando al acuífero del Pitarque, y en segundo lugar la presencia de residuos sólidos que más de un turista muy poco concienciado deja junto a la orilla del río. De hecho, en algunos de los accesos al río y pese a que se trata de un monumento natural, ya prácticamente no queda vegetación por el pisoteo de los visitantes a este espacio protegido. La calidad del hábitat fluvial y del bosque de ribera sigue siendo pese a todo muy alto en todo el trayecto desde el nacimiento hasta poco antes de su confluencia con el Guadalupe. En las inmediaciones de la Ermita de la Virgen de la Peña, otro elemento de patrimonio muy notable que realza la belleza del entorno, se observa un bosque de ribera maduro y complejo en el que destacan los tilos, los avellanos, varias especies de arce, los olmos y el cerezo silvestre. El estrato arbustivo está dominado por el cornejo, el espino albar y los rosales silvestres. De nuevo se observan espumas en las aguas y algún que otro residuo en los puntos más accesibles del tramo estudiado.

Después de dejar el núcleo urbano de Pitarque a su izquierda (ver figuras 2 y 3), el río comienza de nuevo a encajarse formando impresionantes estrechos incididos sobre un macizo calizo con sedimentación vertical, una antesala de los impresionantes órganos de Montoro y un buen hábitat de nutria y de cabra montesa. En este tramo en el que domina la umbría y un microclima frío y húmedo, pero con ventanas de sol gracias a la existencia de antiguos pastos, el bosque de ribera sigue siendo rico y biodiverso y las aguas ganan en calidad y caudal gracias a los aportes de diversas fuentes en la zona, que según los habitantes de Pitarque “nunca se secan”. En este tramo destaca la presencia de majuelo o espino albar, con algún ejemplar monumental, el chopo cabecero, y una variada representación de herbáceas como el *Rubus caesius* o el *Ranunculus montanus*. También son abundantes los musgos y la vegetación subacuática con especies como el *Hydrocotyle ranunculoides*. También es nutrida la presencia de todo tipo de fauna, desde rapaces diurnas y nocturnas, avifauna forestal, buitres leonados y en la fauna terrestre se observan rastros de jabalí, cabra montesa, corzo o zorro. En este tramo, aunque el IHF se muestra en el mapa con un valor medio, el valor en dos tramos es de 69 y 70.

El tramo final hasta la confluencia tiene más dominio del chopo cabecero, aunque se puede encontrar ejemplares de fresno, arce, cornicabras y saúcos. También vale la pena destacar el patrimonio hidráulico de este tramo con las fábricas de Villarluego, un ingenio no documentado en la confluencia con el Guadalupe y fábricas de luz como la del Pitarquejo, con una convulsa historia (Del Romero, 2018), que no suponen ningún obstáculo o barrera para el funcionamiento del río.

Tabla 3. Valores obtenidos mediante el cálculo del IHF y QBR para el río Pitarque

Río Pitarque	Tramo	IHF	QBR
	I	Media (58)	Bueno (80)
	II	Media (56)	Deficiente (45)
	III	Media (56)	Deficiente (50)
	IV	Media (64)	Bueno (85)
	V	Media (67)	Muy bueno (100)
	VI	Alta (90)	Bueno (75)
	VII	Alta (75)	Muy bueno (100)
	VIII	Media (69)	Muy bueno (100)
	IX	Media (70)	Muy bueno (100)
	X	Alta (82)	Bueno (80)

Elaboración propia

3.3. El río Cañada

Aunque este es el menor de los tres ríos y el menos estudiado desde cualquier aspecto, sin duda se trata de un curso fluvial sorprendente por su gran riqueza natural y patrimonial con algunos tramos con una interesante biodiversidad y calidad ambiental. Nace al lado de la Masía de Ana María casi en el límite entre el municipio de Cañada de Benatanduz y de Cantavieja, a unos 1.500 metros. En este primer tramo el río consiste en un hilo de agua casi perenne que va perdiendo altura poco a poco en un paisaje dominado por praderas, pastos y masías. En este estado incipiente los valores de hábitat y de bosque de ribera son bajos por la poca presencia de vegetación de ribera. No obstante, al haber una cobertura completa en prados, sí que hay una interesante representación de vegetación herbácea como el trébol rojo, trébol real, la consuelna o *Delphinium ajacis* o la *Achillea cetacea*.

Antes de rodear Cañada, el río comienza a incidir formando un cañón fluvial casi impenetrable por la vegetación que ha colonizado antiguas terrazas de cultivo, choperas y pastos. Aquí la calidad de su bosque de ribera y hábitats es muy alta según las variables estudiadas, y de hecho en el índice de QBR es el tramo con mayor valor. El río muestra una morfología de bloques, cantos y gravas con frecuentes rápidos y pozas muy aptas para albergar todo tipo de fauna. El entorno del molino de Cañada es especialmente interesante, con varias pequeñas cascadas, una importante presencia de vegetación subacuática, pero sin formar grandes colonias, entre la que destaca el berro de agua en algunos puntos, y unas riberas encajonadas y pobladas de sauces y chopos en la ribera, y de olmos e incluso aliso bastardo (*Rhamnus alpina*). También se observa la presencia de nogales como recuerdo del poblamiento masovero que hubo en estos rincones hasta hace pocas décadas.

Figura 7. a) Cascada junto al Molino de Cañada. b) Tramo encajonado cerca del barranco de la Calzada



Fotografías de los autores

Desde Cañada hasta Villarluego el río permanece encajonado formando un impresionante cañón en el que sobre todo destaca la presencia de aves rapaces y carroñeras. Los índices disminuyen porque tanto la morfología del río como el bosque de ribera es menos diverso, ya que domina el bosque de chopo y un cauce con poca variedad morfológica, con predominio de bloques y pequeños rápidos con agua somera. De los tres ríos estudiados este es sin duda el que presenta más tramos de difícil acceso por la colonización de antiguos pastos por vegetación de ribera, y por la compleja orografía que atraviesa. En el tramo que va desde Villarluego hasta su confluencia con el río Pitarque, sin duda lo más destacable es la combinación de vegetación mediterránea como la cornicabra, sauces, almez y fresnos, con otra de climas más húmedos como el arce, el avellano, y de nuevo cerca de la confluencia, algún bosque de acebo. Cabe destacar que este río presenta un curso de agua escaso pero perenne, pero con algunas muestras de contaminación por la presencia en varios tramos de espumas y turbidez de las aguas, seguramente atribuible a una deficiente depuración de los efluentes urbanos, y tal y como sucede en los otros cursos fluviales, por la carga ganadera en algunos puntos. Los últimos tramos evaluados desde Villarluego presentan unos índices muy altos por la variedad de morfologías fluviales y riqueza de sus bosques de ribera. A esto hay que añadir su interés paisajístico y geomorfológico por tratarse del río que transcurre durante gran parte de su curso encajonado, así como patrimonial por la presencia de varios elementos de interés como el puente de piedra cercano al Mas del Puchero, y molinos como el de Villarluego que se suministraba de agua a partir de un manantial cercano y desaguaba en el río.

Tabla 4. Valores obtenidos mediante el cálculo del IHF y QBR para el río Cañada

	Tramo	IHF	QBR
Río Cañada	I	Baja (37)	Deficiente (35)
	II	Media (51)	Moderado (55)
	III	Muy alta (95)	Muy bueno (100)
	IV	Media (66)	Muy bueno (95)
	V	Media (66)	Moderado (60)
	VI	Muy alta (97)	Muy bueno (95)
	VII	Alta (84)	Bueno (80)

Elaboración propia

4. Discusión: ¿Qué modelo de gestión para el Alto Guadalupe?

Según los datos más actualizados del MITER (2022b), Aragón es la comunidad autónoma con menor superficie protegida por motivos ambientales de toda España. La superficie terrestre protegida apenas supone un 3,53% del total de su territorio cuando la media nacional por autonomía se sitúa en torno al 14,78% (MITER, 2022b). Teruel tiene la peculiaridad geográfica junto con Valladolid de ser las únicas provincias sin ningún parque natural o parque nacional, las figuras de máxima protección natural tanto en España como a escala internacional. No obstante Valladolid está en el puesto 30 en cuanto a superficie mientras que Teruel es la décima. Si se desciende en la jerarquía de espacios naturales protegidos, la segunda figura en importancia sería la reserva natural (Jefatura del Estado, 2007). En este caso tampoco destaca Teruel. Solo los municipios de Bello y Tornos tienen poco más de 2000 hectáreas protegidas dentro de la Reserva Natural de Gallocanta, aunque la mayor parte de este espacio natural, aproximadamente 4.000 hectáreas se encuentran en municipios del Campo de Daroca en Zaragoza (Gobierno de Aragón, 2006). Más allá del Paisaje Protegido de Dornaque de Albarracín, que además no es una figura de protección ambiental, sino de paisaje, Teruel tan solo cuenta con protecciones puntuales en forma de monumento natural. Los cuatro existentes en la provincia están dentro del área de estudio o muy cerca: la Gruta de Cristal de Molinos, el Puente Natural de La Fonseca, los Órganos de Montoro, ambos en el Guadalupe y el Nacimiento del río Pitarque. En conjunto los monumentos naturales ocupan apenas 550 hectáreas. Si a ello sumamos las 2.000 hectáreas de la Reserva Natural de la Laguna de Gallocanta y 6.829 del Paisaje Protegido del Dornaque, en total en la provincia hay 9.380 hectáreas protegidas por motivos más o menos ambientales. Esto representa apenas un 0,6% de la provincia. Esto es una superficie seis veces menor a la media de Aragón, y 25 veces menos que la media nacional. Pareciera que Teruel no es solamente un desierto demográfico en gran parte de su territorio, sino también un territorio con tan poco interés o valor natural que carece casi por completo de Espacios Naturales Protegidos. Es

cierto que en Teruel existen otras figuras de protección del medio ambiente como las ZEC, ZEPA, derivadas de la normativa europea, o las reservas naturales fluviales propuestas por la Dirección Nacional del Agua. Esta última podría ser una figura interesante a proponer para el río Guadalope puesto que su objetivo es preservar tramos de río con escasa o nula intervención humana y en muy buen estado ecológico (Consejo de Ministros, 2015; Zarza, 2023). No obstante, estas figuras, al contrario que la de un parque natural, tan solo ofrecen un marco legal básico de protección, no contienen medidas o planes concretos de gestión y mejora, ni tampoco un presupuesto anual o un régimen sancionador desarrollado. A ello hay que añadir que la competencia de medio ambiente es fundamentalmente de las comunidades autónomas, ya que según reciente Sentencia del Tribunal Constitucional de 22 de julio de 2020 (Sentencia 100/2020): “corresponde a la comunidad autónoma el desarrollo legislativo y la ejecución en materia de medio ambiente y ecología en el marco de la legislación básica del Estado”. Por esta razón la gestión de espacios naturales protegidos corresponde a la comunidad autónoma y la figura con mayor rango legislativo es la de parque natural.

Otros territorios aragoneses con unos valores naturales muy similares sí que fueron declarados como parque natural. El parque natural de la Sierra de Guara en Huesca, por ejemplo, tiene tres elementos de interés que justificaron su protección bajo esta figura: relieve y formaciones kársticas, formaciones periglaciares y un bosque mediterráneo con enclaves de bosque atlántico. Concretamente se menciona la presencia de *Pinus ulcinata* en sus cumbres (Gobierno de Aragón, 1991), especie que también se encuentra en las cumbres del Monegro, muy cerca del nacimiento del río Pitarque. Todos estos valores que justificaron la protección de la sierra de Guara en una fecha tan temprana como 1991, también están presentes en el Alto Guadalope. Por todo ello, resulta no solo necesario, sino incomprensible, que Teruel no cuente en la actualidad con ningún parque natural.

La idea de crear parques naturales en esta provincia no solo no es nueva, sino que es recurrente. En 2008 con motivo de la Exposición Universal de Zaragoza en torno al agua, se comenzó a fraguar la idea de crear un Parque Cultural y/o Natural en las Hoces del Mijares (Ibáñez González, 2016), aunque la idea fue finalmente desestimada, pese a que ya se habían realizado inversiones para abrir y panelizar senderos e incluso se llegó a construir un centro de interpretación que nunca abrió sus puertas. Muy pocos años después, el Comité para la Protección Natural de Aragón emitió un dictamen en 2012 aconsejando la creación de un parque natural en Teruel (Comisión para la Protección de la Naturaleza de Aragón [CPNA], 2012). Analizó cuatro posibles emplazamientos entre los que destacaba el Guadalope, aunque finalmente se decantó como primera opción por los Puertos de Beceite. De hecho, este macizo montañoso está ya protegido tanto en Catalunya como en la Comunidad Valenciana con sendos parques naturales (Parc Natural dels Ports y Parc Natural de la Tinença de Benifassà respectivamente), pero en Aragón carece de protección y además la comarca donde se ubica, el Matarranya, tiene varios proyectos de energías renovables en tramitación. Finalmente, hace pocos años, la Chunta Aragonesista propuso la creación de un parque natural o nacional en las sierras orientales de Teruel, en la que se incluiría la zona de estudio (Diario de Teruel, 2021).

No sería por lo tanto nada descabellado proponer la declaración de un parque natural en Teruel, y concretamente en el Alto Guadalope y Sierra de Gúdar. De hecho, esta figura en primer lugar serviría para unificar la amalgama de figuras de protección puntual o parcial con que ya cuenta: zona de excelencia turística, parque cultural del Maestrazgo, zona de especial conservación de Maestrazgo, Gúdar y de las Muelas y estrechos del río Guadalope, zona de especial protección de aves y Parque Geológico de Aliaga. La mayor parte de figuras vigentes en la actualidad se solapan unas con otras, cada una es dependiente de una administración distinta, y su imperativo legal no garantiza su completa protección. Frente a esta situación de desprotección y la situación totalmente testimonial que ocupa Teruel en materia de espacios naturales protegidos, la creación de un parque natural en la zona de estudio sería una buena medida de protección y desarrollo en un territorio además despoblado y envejecido.

Tal y como se ha visto en los apartados precedentes, Teruel y concretamente el Alto Guadalope tiene valores ambientales suficientes para poder abordar un debate sobre la pertinencia de poner en marcha herramientas de gestión ambiental como son los parques naturales. Concretamente el río Guadalope y sus afluentes el Pitarque y el Cañada tienen un elevado grado de naturalidad, unos valores paisajísticos indiscutibles, una biogeografía de transición poco frecuente entre el Mediterráneo y el Cantábrico, varias especies relictas de las últimas glaciaciones, varias especies de fauna incluidas en el catálogo de especies amenazadas de Aragón, así como un conjunto patrimonial industrial y cultural de gran interés. En los apartados precedentes se ha mostrado cómo desde el punto de vista de la ecología fluvial, fundamentalmente la diversidad biológica y de sus ecosistemas de ribera, aunque haya sido una primera aproximación, el alto Guadalope conserva una calidad ecológica notable en la que destaca la escasez de afecciones en forma de vertidos, contaminación,

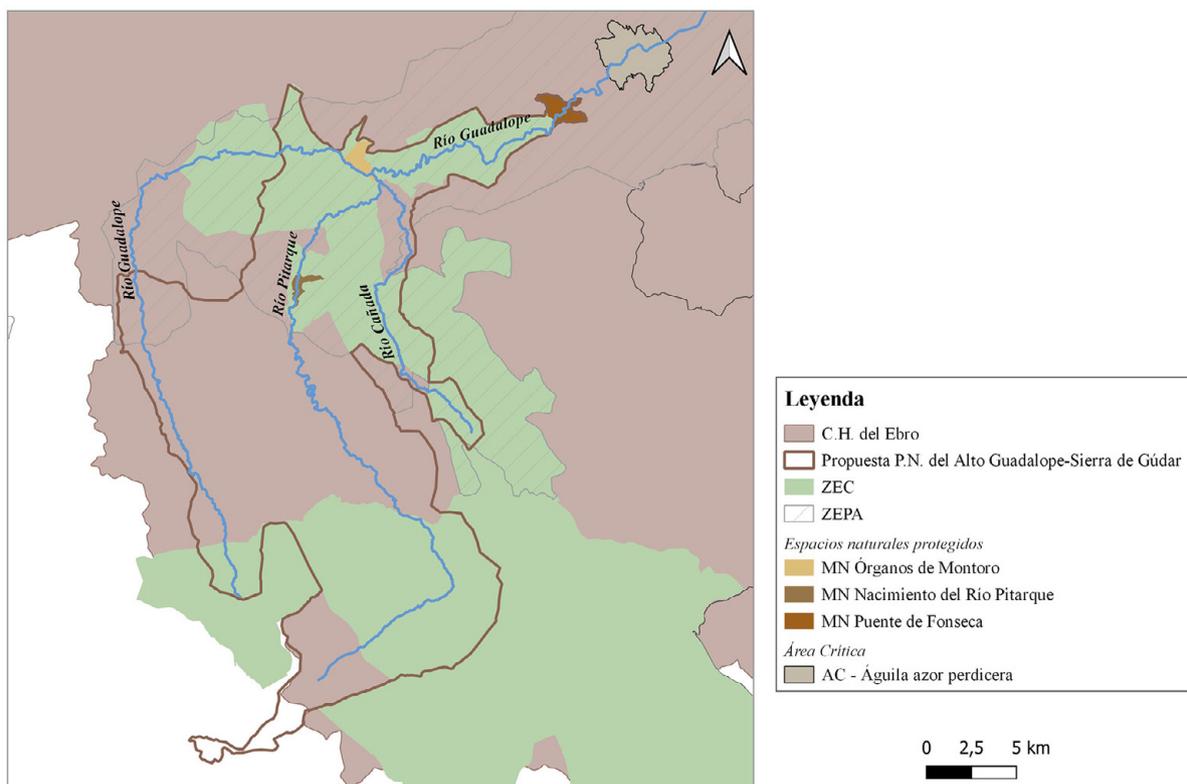
barreras físicas y/o eliminación del bosque de ribera, y la ausencia de especies invasoras, como sí ocurre en el mismo río Guadalupe aguas abajo. Buena muestra de ello es que los índices IHF y QBR son altos. El valor medio más bajo es el de QBR en el río Guadalupe. Otro aspecto reseñable después de este análisis es el diferencial de calidad ambiental entre el cauce principal y sus afluentes. El río Cañada y Pitarque, tributarios del Guadalupe, presentan unos índices de calidad superiores a los del propio cauce principal, mucho más conocido y estudiado. El valor medio de QBR del río Pitarque es de 83 puntos, 20 más que el Guadalupe, y la media de valores promedio IHF-QBR es superior en el río Cañada que en el Guadalupe pese a que se trata de un curso fluvial más corto y con menor caudal. Por otro lado, los valores ambientales del Guadalupe y sus afluentes están en algunos lugares amenazados por algunas afecciones: especialmente el embalse de la central térmica de Aliaga, los residuos en el Monumento natural del río Pitarque y contaminación en algunos puntos debido a la ganadería bovina y a efluentes urbanos con depuración deficiente.

Por todo ello, la creación del parque natural del Alto Guadalupe-Sierra de Gúdar tendría un triple propósito:

- Protección de unos ecosistemas fluviales y de montaña sensibles en un contexto de cambio climático.
- Protección de un territorio de montaña con valores paisajísticos muy altos frente a proyectos de grandes proyectos mineros y de energías renovables.
- Generar un nuevo motor de desarrollo en torno al turismo de naturaleza en un territorio despoblado.

La causa por la que en más de cuarenta años de autogobierno aragonés no se ha conseguido declarar ningún parque natural en Teruel daría para un trabajo monográfico sobre el tema. Resumidamente, al igual que ocurre en muchos otros espacios protegidos, se debe a una mezcla de determinadas resistencias y de desinterés por parte del Gobierno de Aragón. Una de las razones más repetidas para posicionarse en contra de la creación de parques naturales, es la escasa participación efectiva de los actores locales en la gestión del parque, la percepción del parque natural como una lista de prohibiciones y restricciones, más que como una oportunidad de financiación y desarrollo de actividades sostenibles, y la burocratización de la gestión administrativa a todos los efectos (Del Romero, 2023). Las propuestas de creación de parque natural hasta la fecha en Teruel generaron cierto rechazo por incluir grandes superficies con poblaciones importantes dentro de las mismas. La propuesta de creación del Parque natural del Alto Guadalupe y Sierra de Gúdar es mucho más modesta que las que se han puesto encima de la mesa en años recientes, y el modelo de gobernanza que se propone es distinto, al igual que el contexto.

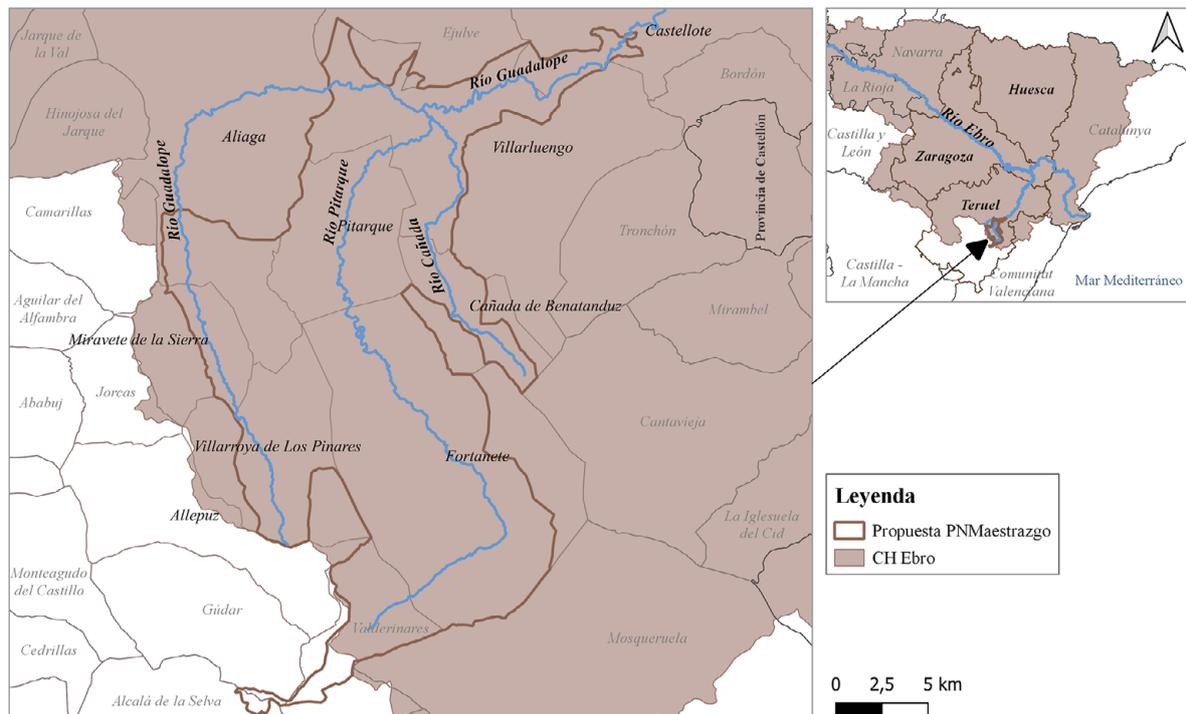
Figura 8. Figuras de protección de la naturaleza vigentes en la zona



Elaboración propia

De entrada, según se puede observar en la figura 12, crear un parque en el alto Guadalupe supondría unificar en una sola figura la cantidad de categorías de protección que actualmente se superponen en este territorio: tres monumentos naturales, una ZEPA y una ZEC. Dicha propuesta integraría los tres monumentos naturales actualmente existentes e incorporaría áreas de especial interés de la ZEC y ZEPA existentes. El parque tendría unas 38.000 hectáreas y sería uno de los más grandes de Aragón en superficie. Afectaría a los municipios de Alcalá de la Selva, Gúdar, Valdelinares, Fortanete, Villarroya de los Pinares, Miravete de la Sierra, Aliaga, Pitarque, Castellote, Villarlugo y Cañada de Benatanduz, un total de once municipios. De estos once municipios, seis núcleos urbanos quedarían dentro del parque, pero el conjunto de habitantes se reduciría a menos de 700. De esta manera se prioriza la protección de los sensibles ecosistemas de ribera de los tres ríos estudiados, pero incluyendo áreas de alta montaña en la Sierra de Gúdar, y solamente un municipio, Pitarque, quedaría íntegramente enclavado en este espacio natural, municipio que ya hoy en día vive en gran medida del turismo de naturaleza.

Figura 9. Propuesta de delimitación del Parque Natural del Alto Guadalupe-Sierra de Gúdar



Elaboración propia

Por otro lado, los conflictos que se han sucedido en los últimos años por motivo de la proliferación de proyectos de energías renovables y de minas con la creación de plataformas como la Plataforma de Defensa de los Paisajes de Teruel, especialmente activa en el Maestrazgo, muestra que en la población local hay un sentimiento de rechazo hacia proyectos de destrucción del paisaje, así como un deseo de gobernar el territorio más participativa, abierta y transparente. En este sentido, la creación del parque natural debería de contar con un órgano rector mucho más participativo, abierto y cercano a la población local que lo que ha sido la tónica dominante en muchos parques naturales (Del Romero, 2023), para evitar el rechazo social en el medio rural hacia la figura de parque natural que es sin duda una de las razones por las que Teruel tiene una política testimonial de espacios naturales protegidos. Los ríos de Teruel y particularmente el Guadalupe son ecosistemas sensibles y de gran valor ambiental, pero además pueden ser una buena oportunidad para diversificar el turismo rural y para luchar contra la despoblación.

5. Conclusiones

Teruel no es precisamente un territorio demasiado conocido por su riqueza natural. En una comunidad autónoma como Aragón que tiene parte del Pirineo, uno de los macizos montañosos más atractivos de la península, la política de protección de espacios naturales en Teruel ha sido testimonial. Esta política se resume en cuatro monumentos naturales y un paisaje protegido, además de una pequeña parte de una reserva natural.

En total un 0,6% de la superficie de la provincia tiene algún tipo de protección efectiva más allá de la protección genérica que confiere la Red Natura 2000. Sin embargo, en este trabajo se ha podido demostrar que hay valores naturales interesantes para proponer la creación del primer parque natural de Teruel.

Para ello se ha realizado un análisis de la ecología fluvial del río Guadalupe en su tramo alto y de sus dos principales afluentes como son el Cañada y el Pitarque. En un contexto de sequía y de emergencia climática, los ecosistemas de bosque de ribera son seguramente los más amenazados junto con los de alta montaña, particularmente las zonas glaciares y praderías en altura. A ello hay que añadir la amenaza que supone la proliferación de proyectos de energías renovables y de minería de arcillas en territorios con una gran biodiversidad florística y faunística, así como un patrimonio cultural e industrial de gran valor, pero que en la actualidad carecen de protección. La metodología de trabajo empleada para determinar el valor ecológico del alto Guadalupe, los índices IHF y QBR, han dado como resultado para los tres ríos evaluados unos valores medios de entre 63 y 83 puntos, lo que indica un estado ecológico de moderado a muy bueno. A ello hay que añadir toda una serie de especies de gran interés botánico y faunístico, algunas de las cuales además están ya protegidas e incluidas en el Listado Aragonés de especies amenazadas.

A partir de este análisis se ha diseñado una propuesta inicial de parque natural que incorporaría estos cursos fluviales, así como la Sierra del Monegro que actúa como área fuente para éstos y que posee a su vez unos valores naturales y paisajísticos notables. La propuesta realizada se ha diseñado con una lógica de proteger cuencas fluviales y por eso su trazado coincide en gran parte con las divisorias de aguas con otros ríos. No obstante, para que esta idea prosperase sería necesario profundizar y ampliar el debate, en primer lugar, sobre las razones que hay detrás de que un territorio de tanto valor natural no tenga ni un solo parque natural y, en segundo lugar, para proponer una política ambiental más próxima a la población local y con una mayor participación ciudadana y del tejido asociativo local. La conflictividad ambiental desatada en torno a muchos proyectos de energías renovables en la zona, así como de minas demuestra que a protección de espacios de interés natural no es solamente un mandato de la Unión Europea, sino también una demanda ciudadana del medio rural, pero una demanda condicionada a cambiar la manera de gobernar y gestionar estos espacios con una perspectiva más abierta y cercana.

Referencias

- AEMET (2023). *Resumen anual climatológico 2022*. https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/14315/1/res_anual_clim_2022.pdf
- Agencia Catalana del Agua (2006). *Protocolo para la valoración de la calidad hidromorfológica de los ríos*. Agència Catalana del Agua.
- Aguilella i Palasí, A. (1998). Catálogo florístico del término de Ladruñán (Castellote, Maestrazgo, Teruel). *Flora Montiberica*, (52), 3-21.
- Aguilella i Palasí, A. (2014). Adiciones al catálogo florístico del término de Ladruñán, (Castellote, Maestrazgo, Teruel). *Flora Montiberica*, (58), 18-23.
- Calvo, J. P., Alcalá, L., & Simón, J.L. (2010). Geología de la provincia de Teruel. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, (18.2), 134-140.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (1998). *Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro*. Sistema Guadalope. <https://www.chebro.es/sistema-guadalope>
- Consejo de Ministros (2015). Resolución de 2 de diciembre de 2015, de la Dirección General del Agua, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 20 de noviembre de 2015, por el se declaran determinadas reservas naturales fluviales. «BOE» núm. 301, de 17 de diciembre de 2015, páginas 118986 a 118995.
- Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón (CPNA) (2012). Dictamen del consejo de protección de la naturaleza de aragón sobre la propuesta para la declaración de una zona en la provincia de teruel como espacio natural protegido en la categoría de parque natural. https://www.aragon.es/documents/20127/674325/Dictamen_TERUEI_parquenatural.pdf/e75cba48-7fab-ba20-554d-b6e7d0754eef
- Del Romero, L. (2018). *Los ingenios de Las Bailías. Patrimonio industrial y despoblación en el Maestrazgo*. Centro de Estudios del Maestrazgo.
- Del Romero, L., Valera Lozano, A., & La Roca Cervigón, N. (2021). *En busca de la Ferté: un viaje por el patrimonio industrial y minero abandonado de Teruel*. Recartografías.
- Del Romero, L. (2023). *El arte de vivir en la España vaciada colonialismo energético, crisis climática y transición ecosocial*. Fuhem.
- Departamento de Agricultura (2011). *Manual de gestión del habitat: Ficha de manejo y conservación HIC-9380-MED*. https://www.aragon.es/documents/20127/674325/9380_HIC_MED.pdf/a3b3ae4b-cb82-cd23-60ba-a41b446b0348
- Diario de Teruel (2021, December 11). CHA propone un Parque Nacional en las sierras orientales de la provincia. *Diario de Teruel*. <https://www.diariodeteruel.es/teruel/cha-propone-un-parque-nacional-en-las-sierras-orientales-de-la-provincia>
- Elosegui, A. & Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA.
- Fabregat Lluca, C. & López Udias, S. (1993). Sobre la presencia de *Goodyera repens* (L.) R. Br. en el Alto Maestrazgo (Castellón-Teruel). *Collectanea Botanica*, (22), 154-155.
- Gamarra Gamarra, R. & Ortúñez Rubio, E. (2007). Riqueza florística de las orquídeas silvestres (familia orchidaceae) en la provincia de Teruel. *Revista Teruel*, (91), 91-101.
- Gobierno de Aragón (1991). Ley 14/1990, de 27 de diciembre, por la que se declara el Parque de la Sierra y Cañones de Guara. “BOA” nº 8 de 21 de enero de 1991.
- Gobierno de Aragón (2006). Decreto 42/2006, de 7 de febrero, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba definitivamente el Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de la Laguna de Gallocanta. “BOA” nº 22 de 22 de febrero de 2006.
- Gobierno de Aragón (2022). Catálogo de Especies Amenazadas en Aragón. <https://www.aragon.es/-/catalogo-de-especies-amenazadas-en-aragon>

- González Cano, J.M. (2007). Flora, vegetación y fauna. In J. Ibáñez González (Ed.), *Comarca del Maestrazgo*. Zaragoza: Gobierno de Aragón.
- Instituto Aragonés de Estadística (2023). Estadística local y comarcal. <https://bonansa.aragon.es/iaest/ficmun/pdf/30.pdf>
- Ibáñez González, J. (2016). *Las hoces del Mijares y los estrechos del Diablo. Propuesta de Parque Cultural*. Hoces del Mijares.
- Jefatura del Estado (2007). Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. BOE nº 299, de 14 de diciembre de 2007.
- Jiménez, J. & Palomo, J. J. (1998). Utilización de refugios por la nutria en el río Bergantes (Cuenca del Ebro). *Galemys*, (10), 167-173.
- La Vanguardia (2023, June 7). *Aemet: El 2022 fue un año "excepcional", con 35 récords diarios de temperaturas altas*. <https://www.lavanguardia.com/vida/20230607/9024586/aemet-2022-ano-excepcional-35-records-diarios-temperaturas-altas.html>
- Likens, G.E. (2010). *River ecosystem ecology: a global perspective*. Elsevier.
- Longares, L.A., Gosálvez Rey, R. U., & Ballesteros Pelegrín, G. A. (2017). Caracterización de la comunidad faunística en relación con el abandono rural en la montaña mediterránea turolense (Allepuz). In N. La Roca Cervigón, R. Varela Ona, P. Lozano Valencia, & A. Longares Aladrén (Eds.), *Dinámicas ambientales y paisajísticas ligadas al abandono rural del supramediterráneo de Gúdar-Maestrazgo* (pp.125-154). Publicaciones de la Universidad del País Vasco.
- Lozano, M.V. (2007). Geología y geomorfología. In J. Ibáñez González (Ed.), *Comarca del Maestrazgo* (pp. 19-36). Zaragoza: Gobierno de Aragón. <https://www.aragoneria.com/aragon/comarcas/comarca-maestrazgo.pdf>
- Madhav, S., Kanhaiya, S., Srivastav, A. L., Singh, V. B., & Singh, P. (Eds.), (2022). *Ecological significance of river ecosystems. Challenges and management strategies*. Elsevier.
- Marinescu, I. (2023, April 14). Vecinos de Seno preparan alegaciones contra las minas Aragón y Graderas II. *La Comarca*. <https://www.lacomarca.net/vecinos-seno-preparan-alegaciones-contra-minas-aragon-graderas/>
- Martín, I. (2023, April 26). Varias zonas del Ebro entrarán en situación de emergencia este domingo. *El Periódico*. <https://www.elperiodicodearagon.com/aragon/2023/04/26/cuencas-ebro-emergencia-sequia-sequia-extraordinaria-86509262.html>
- Mata-Perelló, J.M. (2010). Recorrido geológico y mineralógico por el Maestrazgo: desde Villarluego hasta La Algecira. *Algeps, Revista de geología, Serie B*, (522), 3-11. <https://doi.org/10.5821/algeps.522.3099>
- Mata-Perelló, JM. & Sanz Balaguer, J. (2015). Recorrido geológico, mineralógico y geográfico por la comarca del Maestrazgo: desde el Puerto del Cuarto Pelado (Cantavieja) a la Cañada de Benatanduz y a Villarluego. *Algeps. Revista de geología*, (3), 2-13. <https://doi.org/10.5821/algeps.3.4629>
- Mateo Sanz, G. (1990). *Catálogo florístico de la provincia de Teruel*. Instituto de Estudios Turolenses. Diputación de Teruel.
- Mateo Sanz, G., Lozano Terrazas, J.L., & Aguilera i Palasí, A. (2013). *Catálogo florístico de las sierras de Gúdar y Javalambre (Teruel)*. Jolube.
- Ministerio de Agricultura (2015). Real Decreto 817/2015, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. «BOE» núm. 219, de 12 de septiembre de 2015.
- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (2021). *Guía para la evaluación del estado de las aguas superficiales y subterráneas*. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/guia-para-evaluacion-del-estado-aguas-superficiales-y-subterranas-tcm30-514230.pdf>
- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (2022a). Resolución de 1 de diciembre de 2022, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por la que se formula declaración de impacto

ambiental del proyecto «Parques eólicos Cabecero, Concejo, Cid, Estrella y Vacada (Total 22 parques: Clúster Maestrazgo) en la provincia de Teruel, su infraestructura de evacuación hasta la SET Morella 400 en Morella (Castellón) y acondicionamiento de accesos para transportes especiales». «BOE» nº 307 de 23 de diciembre de 2022.

- Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (2022b). *Espacios naturales protegidos*. [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/enp_descargas.html#prettyPhoto\[pp_gal\]/0/](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/enp_descargas.html#prettyPhoto[pp_gal]/0/)
- Pardo, I., Álvarez, M., Casas, J., Moreno, J.L., Vivas, S., Bonada, N., Alba-Tercedor, J., Jáimez-Cuéllar, P., Moyà, G., Prat, N., Robles, S., Suárez, M.L., Toro, M., & Vidal-Abarca, M.R. (2002). El hábitat de los ríos mediterráneos. Diseño de un índice de diversidad de hábitat. *Limnetica*, 21(3-4), 115-13. <https://doi.org/10.23818/limn.21.21>
- Planelles, M. (2023, June 6). Paralizada por primera vez la reintroducción de una especie amenazada en España por un macroparque eólico. *El País*. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2023-06-06/paralizada-por-primera-vez-la-reintroduccion-de-una-especie-amenazada-en-espana-por-un-macroparque-eolico.html>
- Puebla, P., Lanaja, J., Sarasa, D., & Sánchez, D. (2000). Estudio previo de las aguas de la cuenca del río Guadalope. Examen de calidad por parámetros, clasificación según la normativa de la CEE y del ICG. *Revista del Instituto de Estudios Turoleses*, (89), 311-329.
- Rajadel, L. (2023, March 18). Alegaciones contra las minas proyectadas en Rubielos de Mora y Cuevas de Cañart. *El Heraldo*. <https://www.heraldo.es/noticias/aragon/teruel/2023/03/18/alegaciones-contra-las-minas-proyectadas-en-rubielos-de-mora-y-cuevas-de-canart-1638855.html>
- Rosignoli, A. & Génova, M. (2003). Corología y hábitat de *ulmus glabra huds.* en la península ibérica. *Ecología*, (17), 99-121.
- Sabater, S. & Stevenson, R.J. (2010). Foreword: Global change and river ecosystems – implications for structure, function and ecosystem services. In R. J. Stevenson & S. Sabater (Eds.), *Global Change and River Ecosystems-Implications for Structure, Function and Ecosystem Services* (Vol. 215, pp. 1-2). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-0608-8>
- SAIH Ebro (2023). *Estaciones de aforo en río. Sistema Guadalope-Martín*. <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/mapas/tipoestacion:A/localizar:A099>
- Sentencia 100/2020, de 22 de julio de 2020. Recurso de inconstitucionalidad 1893-2019. Interpuesto por el presidente del Gobierno respecto del artículo 23 de la Ley Foral 14/2018, de 18 de junio, de residuos y su fiscalidad. Competencias sobre protección ambiental y ordenación de la actividad económica: constitucionalidad del precepto legal foral que establece limitaciones progresivamente más estrictas al uso de bolsas de plástico. «BOE» núm. 220, de 15 de agosto de 2020, páginas 70811 a 70832.
- Zarza, L.F (2023). *¿Qué es una reserva natural fluvial?* <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-reserva-natural-fluvial>

El patrimonio geomorfológico del Macizo de Peña Ubiña: propuesta de lugares de interés geomorfológico en un espacio natural protegido

The geomorphological heritage of Peña Ubiña Massif: proposal of geomorphosites in a protected natural area

AUTORÍA

David Gallinar Cañedo 

Departamento de Geografía, Universidad de Oviedo. Asturias, España.

Jesús Ruiz Fernández 

Departamento de Geografía, Universidad de Oviedo. Asturias, España.

Cristina García

Hernández 

Departamento de Geografía, Universidad de Oviedo. Asturias, España.

Mirella Ochoa Álvarez 

Departamento de Geografía, Universidad de Oviedo. Asturias, España.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25016>

CITACIÓN

Gallinar Cañedo, D., Ruiz Fernández, J., García Hernández, C., & Ochoa Álvarez, M. (2024). El patrimonio geomorfológico del Macizo de Peña Ubiña: propuesta de lugares de interés geomorfológico en un espacio natural protegido. *Investigaciones Geográficas*, (81), 131-154. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25016>

CORRESPONDENCIA

David Gallinar Cañedo (gallinardavid@uniovi.es)

HISTORIA

Recibido: 7 junio 2023
Aceptado: 31 diciembre 2023
Publicado: 26 enero 2024

TÉRMINOS

© David Gallinar Cañedo, Jesús Ruiz Fernández, Cristina García Hernández y Mirella Ochoa Álvarez

 Este trabajo se publica bajo una licencia [Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resumen

El Macizo de Peña Ubiña es uno de los enclaves montañosos de mayor elevación y con valores naturales más destacados de las Montañas Cantábricas, lo que ha sido un aspecto clave para su declaración como Parque Natural y Reserva de la Biosfera. Entre los procesos y formas de relieve identificados en dicho macizo se encuentran morfologías de génesis glacial, periglacial y nival, gravitacional, fluvio-torrencial, lacustre, kárstica, mixta y de origen antropogénico. La variedad de geoformas mencionada y la diversidad litológica de Peña Ubiña, definida por el predominio de calizas y en menor medida, dolomías, cuarcitas, areniscas cuarcíticas, areniscas y pizarras, que abarcan todos los periodos geológicos del Paleozoico a excepción del Pérmico, generan una rica geodiversidad merecedora de protección específica, estudio y divulgación. La identificación del patrimonio geomorfológico es clave para una correcta planificación y gestión de este espacio natural protegido, así como su revalorización como recurso científico y didáctico. A partir de una metodología empleada en trabajos precedentes y adaptada a las características del área de estudio, en este trabajo se han identificado diecisiete geomorfositos que representan los valores citados, y cuyo conocimiento puede contribuir a la adecuada gestión de esta área singular en el contexto de las Montañas Cantábricas.

Palabras clave: patrimonio geomorfológico; glaciario; periglaciario; karst; Macizo de Peña Ubiña; formas nivales.

Abstract

The Peña Ubiña Massif is one of the highest mountain areas with most outstanding natural values in the Cantabrian Mountains, which has been a key aspect for its declaration as a Natural Park and Biosphere Reserve. Among the processes and landforms identified are features of glacial, periglacial, nival, gravitational, fluvio-torrential, lacustrine, karstic, mixed genesis and anthropogenic origin. These landforms and the lithological diversity of this massif are characterized by a predominance of limestones and, to a lesser extent, dolomites, quartzites, sandstones and slates, covering all the geological periods of the Paleozoic with the exception of the Permian. They generate a rich geodiversity deserving of specific protection, study and dissemination. The identification of the geomorphological heritage is fundamental for the proper planning and management of this protected natural area, as well as its enhancement as a scientific and educational resource. Based on a methodology

used in previous works and adapted to the characteristics of the study area, in this contribution, seventeen geomorphosites that represent the aforementioned values have been identified. A more in-depth knowledge of them can contribute to the proper management of this unique area in the context of the Cantabrian Mountains.

Keywords: geomorphological heritage; glacial landforms; periglacial landforms; karst; Peña Ubiña Massif; nival landforms.

1. Introducción

El patrimonio geomorfológico es un importante recurso natural con altos valores científicos, culturales, paisajísticos y educativos. Por tanto, constituye una riqueza potencial que debe ser catalogada, protegida y difundida para lograr un aprovechamiento óptimo y sostenible. En España algunos autores ya han realizado esfuerzos previos por dar a conocer el geopatrimonio y los geomorfositos en otros emplazamientos (González Trueba & Serrano, 2008; González Amuchastegui et al., 2014; Bazán, 2014; Fernández et al., 2015; Bazán, 2016), así como en otros países (Feuillet & Sourp, 2011; Artugyan, 2014; Martín Vivaldi Caballero et al., 2016; Coratza & Hobléa, 2018; Duval & Campo, 2018; Pijet Migoñ & Migoñ, 2022), e incluso se han aportado guías para su identificación y gestión (Pedraza Gilsanz, 1996; Reynard & Panizza, 2005; Martínez, 2008; Mendoza Ontiveros et al., 2011; Palacio Prieto, 2013; Mikkan, 2016). Al respecto de la protección geológica/geomorfológica, existen en la actualidad quince Geoparques Mundiales de la UNESCO, integrados también en la Red Europea y Global de Geoparques, repartidos por parte de la geografía española: El Hierro (Islas Canarias), Lanzarote y Archipiélago Chinijo (Islas Canarias), Sobrarbe-Pirineos (Huesca), Maestrazgo (Teruel), Cabo de Gata-Níjar (Almería), Sierras Subbéticas (Córdoba), Granada (Granada), Sierra Norte de Sevilla (Sevilla), Villuercas Ibores-Jara (Cáceres), Molina-Alto Tajo (Guadalajara), Orígens (Lérida), Cataluña Central (Barcelona), Costa Vasca (Guipúzcoa), Las Loras (Burgos y Palencia), Montañas do Courel (Lugo), los cuales albergan en un territorio definido un importante patrimonio geológico utilizado para su desarrollo sostenible. Así pues, por Comunidades Autónomas Andalucía cuenta con cuatro, Aragón, Cataluña y las Islas Canarias con dos, y Galicia, País Vasco, Extremadura, Castilla y León y Castilla La Mancha con uno. Asimismo, también existen otras figuras de protección, como los Monumentos Naturales, además de algunas que ponen en valor el patrimonio geológico de determinados puntos, como los Geositos y los Lugares de Interés Geológico (LIG), inventariados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

En este sentido, hay un importante vacío en el Macizo Asturiano ya que, si bien se han realizado varias propuestas de LIG (en el Macizo de Peña Ubiña existen dos: las Surgencias intermitentes de Los Garrafes y el Complejo Glaciar del Macizo de Ubiña), los cuales permiten obtener información geológica para su conservación y revalorización, y algunos Monumentos Naturales de carácter geológico o geomorfológico (ejemplos: Cueva Güerta, Cueva de Deboyu, Marabiu, Ruta del Alba, Yacimientos de icnitas), no se ha desarrollado ninguna propuesta para la creación de un Geoparque en dicho ámbito montañoso. En este sentido, el Macizo de Peña Ubiña presenta una geodiversidad de gran relevancia e interés para la investigación científica y para el conocimiento del público en general, pues cuenta con numerosas evidencias del glaciario cuaternario que afectó a este área, morfologías propias de ambientes periglaciares activos, un relieve exokárstico y endokárstico muy desarrollado, numerosas huellas erosivas provocadas por la acción fluviotorrencial, e incluso formas estructurales como pliegues y fallas de trascendencia regional.

Los estudios propiamente geomorfológicos que se han centrado en el Macizo de Peña Ubiña son escasos, aunque actualmente están en pleno auge. Los primeros trabajos geológicos que abarcaron este espacio, como parte de uno más amplio, se retrotraen a la centuria decimonónica y comienzos del siglo XX (Schulz, 1857, 1858; Adaro, 1914, 1926; Adaro & Junquera, 1916, 1926). Sin embargo, los pioneros en estudiar el glaciario de estas montañas fueron Stickel (1929), Corugedo (1932) y Nussbaum & Gygax (1952), quienes documentaron la existencia de antiguos glaciares en el entorno, sin profundizar en detalle. Estos estudios fueron sucedidos por otros de carácter principalmente geológico (Hernández Sampelayo, 1942; Gómez de Llarena, 1946; Gómez de Llarena & Rodríguez Arango, 1948; Llopis Lladó, 1952, 1954a, 1954b, 1955; García Fuente, 1956, 1959; Marcos, 1968a, 1968b; Martínez Álvarez et al., 1968, 1969; García Loygorri et al., 1971; Julivert & Marcos, 1971) que aportaron información sobre la litología y las estructuras, aunque obviaron los aspectos geomorfológicos, así como por la obra de Llopis Lladó & Jordá Cerdá (1957), que supuso el primer Mapa del Cuaternario de Asturias. Así pues, hasta la década de 1980, el Macizo de Peña Ubiña permanecía prácticamente como una *terra incognita* de la geomorfología. Los primeros en aportar algunos aspectos descriptivos fueron Marcos et al., 1980; Truyols et al., 1982, con la publicación de la II serie del Mapa Geológico de España (MAGNA) y su memoria explicativa, pero fue Castañón (1983, 1984, 1989) quien pormenorizó por primera vez algunos estudios geomorfológicos de detalle centrados en Peña Ubiña, estudiando el glaciario cuaternario de todo el conjunto del macizo, efectuando una primera aproximación de la posible extensión

de los glaciares durante la Máxima Extensión del Hielo (MEH) dentro de la Última Glaciación, y abordando las morfologías derivadas de los aludes de nieve en la vertiente meridional de El Preu l'Albu, montaña situada en el sector central del macizo. En este último caso, se trata de un estudio que pone de relieve el papel modelador ejercido por los aludes de nieve, plenamente activos hoy en día, en un sector de moderada altitud (Castañón, 1984). Asimismo, otros autores como Brosche (1978) mencionaron a Peña Ubiña como un enclave propicio para el desarrollo de los procesos periglaciares. Tras estas aportaciones, realizadas en la década de 1980 y anteriores, continuaron proliferando los trabajos geológicos (Aller, 1981, 1984; Fernández, 1992, 1993; Martínez Abad, 2007; Alonso et al., 2007, 2008), si bien, los aspectos geomorfológicos quedaron, por lo general, en segundo plano. No obstante, García de Celis & Martínez Fernández (2002) contribuyeron a mejorar el conocimiento sobre el glaciario en la vertiente leonesa de Peña Ubiña. En cuanto al endokarst, aunque existen someras descripciones desde hace más de un siglo (Suárez Uriarte, 1922), el Macizo de Peña Ubiña ha sido explorado por grupos espeleológicos desde la década de 1980, que han aportado numerosas descripciones y cartografía (Rodríguez Pevida et al., 1982; Puch, 1998; Puerta Elorza, 2000; Ballesteros, 2008; Grupo Espeleológico Polifemo, 2010; Interclub Ubiña del Colectivu Asturianu d'Espeleólogos, 2013). Recientemente el número de investigaciones sobre el Macizo de Peña Ubiña, ya sean específicos, periféricos o integrados en espacios más amplios, y su diversidad han aumentado exponencialmente, con estudios sobre glaciario (Rodríguez Rodríguez et al., 2015; González Gutiérrez et al., 2017; Oliva et al., 2019; González Díaz et al., 2021; Ruiz Fernández et al., 2022; Santos González et al., 2022), periglaciario (Peña Pérez, 2021; Gallinar et al., 2022a), nieve, nivación y aludes (García Hernández et al., 2018, 2019; Gallinar et al., 2022b; Melón Nava, 2023), karst (Gallinar et al., 2021), más generalistas (Alonso, 2014, 2019) e incluso formas derivadas de la actividad humana y de la acción bélica (Llamazares, 2021).

A pesar de la mejora en el estado de conocimiento geomorfológico de las Montañas Cantábricas, del inventariado de los LIG y de la creación de algunos geoparques en España, existe, en definitiva, un significativo desconocimiento y un importante vacío en forma de figuras de protección que permitan conservar y divulgar los valores y la riqueza de las formas de relieve, limitando la apreciación de la geodiversidad, por lo que es necesario profundizar más en el estudio, la catalogación y declaración, así como la difusión del geopatrimonio, incorporándolo como un elemento más de suma importancia en el desarrollo socioeconómico de los espacios implicados. Así pues, el principal objetivo del presente trabajo consiste en hacer una aportación que contribuya a paliar dichas lagunas, aportando un documento que sirva como base para la conservación de las geoformas del Macizo de Peña Ubiña y, por extensión, del resto de sierras y macizos cantábricos, y específicamente: 1) proporcionar un conocimiento detallado de la geodiversidad del Macizo de Peña Ubiña; y 2) contribuir a la divulgación de los valores geomorfológicos de este sector de la alta montaña cantábrica.

2. Metodología

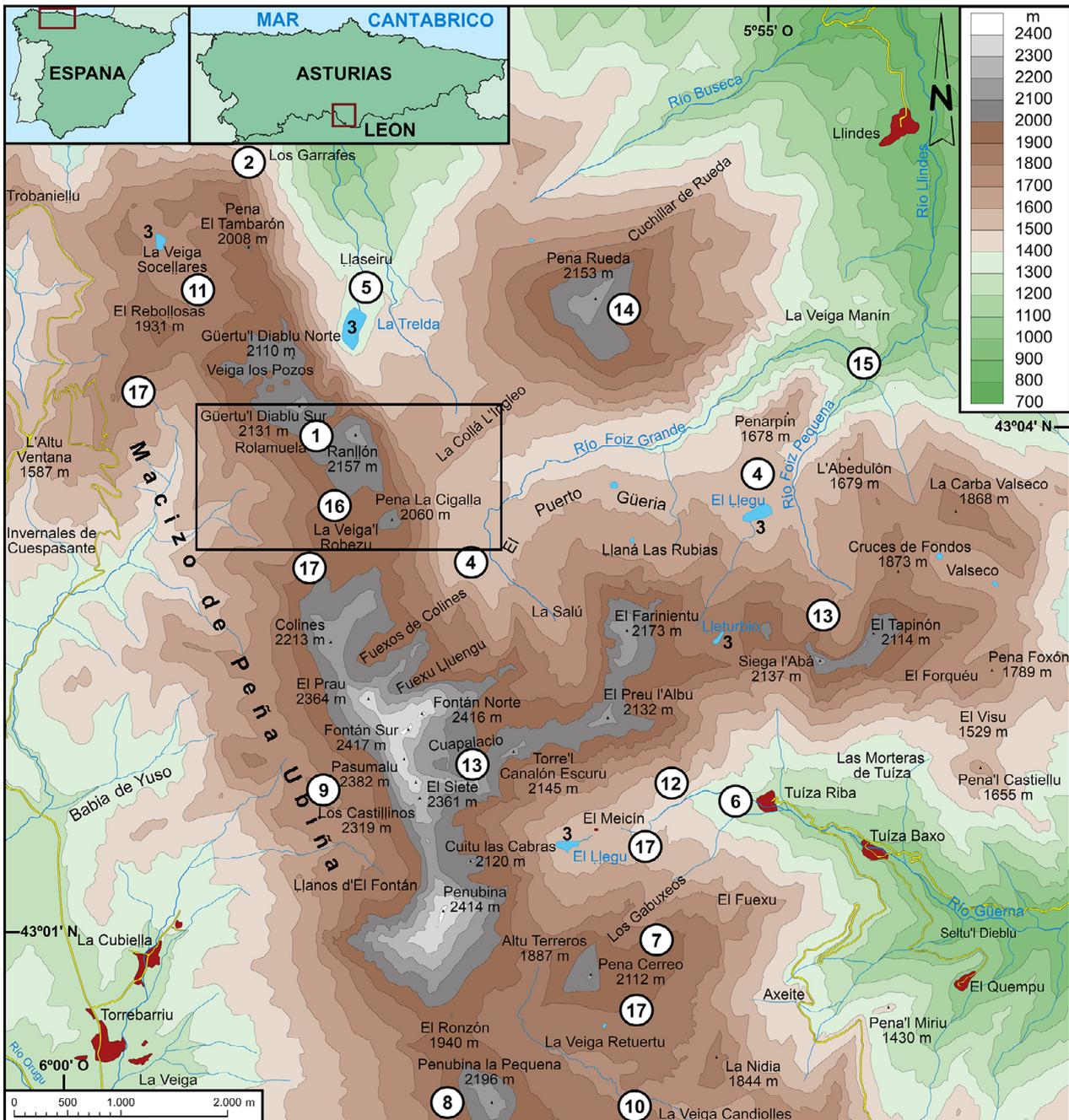
2.1. Área de estudio

El Macizo de Peña Ubiña se sitúa en el sector central del Macizo Asturiano, desde donde se alza 400 metros por encima de las montañas circundantes que hacen de divisoria de aguas entre el Principado de Asturias y la provincia de León (Figura 1). Las principales cimas por altitud del área de estudio son: El Fontán sur (2.417 m s.n.m.), El Fontán norte (2.416 m s.n.m.), Penubina la Grande (2.414 m s.n.m.), Pasumalu (2.382 m s.n.m.), Pena Redonda (2.364 m s.n.m.) y El Siete (2.361 m s.n.m.), siendo la prominencia del techo de estas montañas de 1.137 metros, la segunda mayor del Macizo Asturiano, con categoría de prominente.

Geológicamente el Macizo de Peña Ubiña queda encuadrado en el sector noroccidental del Macizo Hespérico, y más concretamente en el área centro-sudoeste de la Zona Cantábrica (Lotze, 1945), quedando rodeado por el sur y por el oeste por la Zona Asturoccidental-Leonesa (Julivert, 1983; Rodríguez Fernández, 1983). Así pues, este macizo montañoso se sitúa en un sector de contacto entre la Región de Pliegues y Mantos, orientada al oeste e integrada por el Manto de Bodón en la Unidad de la Sobia-Bodón, y la Cuenca Carbonífera Central, hacia el este. Además, el Macizo de Peña Ubiña está enclavado sobre la bisectriz del ángulo del Arco Astúrico (conocido también como Rodilla Astúrica o Arco Ibero-Armoricense, Castañón, 1983; Aller, 1984) en un sector atravesado por la Falla de León (Marcos, 1968b) que hace de límite entre la Región de Pliegues y Mantos (de vergencia centrípeta respecto al trazado del Arco Astúrico), y la Cuenca Carbonífera Central (de vergencia centrífuga), por lo que dichas unidades geológicas se disponen con vergencias opuestas (Llopis Lladó, 1964). Este ámbito de gran complejidad geológica, el cual se ubica en la confluencia de diferentes unidades afectadas por cabalgamientos y actividad tectónica, han labrado el almacén del Macizo de Peña Ubiña, en el cual proliferan numerosos tipos de estructuras de diferente naturaleza, entre los que destacan algunos tipos de pliegues y escamas cabalgantes, configurando este espacio geográfico con desniveles de gran inclinación, paredes subverticales y escarpes rocosos afectados por fracturas y debilidades

estructurales que los retocan en detalle. El área de estudio se compone fundamentalmente de estratos de calizas carboníferas que debido a su disposición tectónica llegan a sobrepasar los 1.000 metros de potencia, aunque también afloran otros materiales como dolomías, pizarras, areniscas, cuarzoareniscas, cuarcitas y conglomerados, que abundan sobre todo en el centro y el sur del macizo (Marcos, 1968a; Aller, 1981, 1984; Truyols et al., 1982). Estos materiales son mayoritariamente paleozoicos, ocupando casi todos sus periodos a excepción del Pérmico; además, también aflora una reducida sucesión cretácica en la Plataforma de Ce-reo y Penubina la Pequena (Alonso et al., 2007; Martínez Abad, 2007).

Figura 1. Mapa del Macizo de Peña Ubiña con los geomorfositos propuestos. El rectángulo se corresponde con el área representada en la Figura 2



- 1) Sistemas endokársticos del Macizo de Peña Ubiña; 2) surgencias intermitentes de Los Garrafes; 3) lagos, lagunas y turberas del Macizo de Peña Ubiña; 4) El Puerto Güeria; 5) Llaseiru; 6) valle glaciar de El Meicín; 7) Pena Cerreo; 8) Penubina la Pequena; 9) La Becerrera; 10) La Veiga Retuertu y La Veiga Candiolles; 11) La Veiga Socellares; 12) canales y conos de aludes de El Preu l'Albu y el Siega l'Abá; 13) cimas y circos glaciares del Macizo de Peña Ubiña; 14) Pena Rueda; 15) desfiladeros de La Foiz Grande y La Foiz Pequena; 16) plataforma calcárea del Güertu'l Dieblu; 17) fortificaciones militares de la Guerra Civil del Macizo de Peña Ubiña.

Elaboración propia

Respecto al clima en el Macizo de Peña Ubiña, está definido por temperaturas frías en los sectores culminantes, las cuales se suavizan en los valles de menor altitud (Ortega Villazán & Morales Rodríguez, 2015). Además, la pluviosidad es elevada, con clara preferencia por el sector asturiano (norte), afectado por los frentes húmedos del Atlántico procedentes del norte y el noroeste, y por el efecto foehn. Esto está determinado por el abrupto gradiente altitudinal que se desarrolla en este macizo, donde se salvan más de 2.000 metros de altitud en 15 kilómetros de distancia, provocando que esta barrera orográfica condicione el estancamiento de la nubosidad induciendo con cierta frecuencia a las nieblas y las precipitaciones en Asturias, siendo más frecuentes los días despejados en León. Dicho fenómeno queda patente al observar los datos de las estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en puntos altos y próximos al Macizo de Peña Ubiña, como El Brañiñín (1.480 m s.n.m., Asturias), donde se recoge una media de 1.406,3 mm anuales, mientras que en Miñera de LUNA (1.120 m s.n.m., León), estas cantidades se reducen considerablemente hasta medias anuales de 957,6 mm, aunque se encuentren únicamente a 13 kilómetros de distancia entre sí. Asimismo, las cantidades recogidas aumentan ~80 mm por cada 100 metros de ascenso altitudinal (Gómez Villar, 2006), por lo que se estiman en 2.100-2.200 mm anuales las cantidades que pueden alcanzarse en las cotas más altas, o que incluso superen los 2.500 mm, como propone Muñoz Jiménez (1982) para los Picos de Europa. Estas precipitaciones, además, suelen producirse en forma de nieve en el ~70 % de las ocasiones, sumando alrededor de 85 días de nevada anual, extrapolando los datos obtenidos por Muñoz Jiménez (1982) para los Picos de Europa y los registros de la estación de Lleitariegos (1.530 m s.n.m., AEMET), donde se dieron una media de 83 días de nevada anual repartidas en 10 meses (quedando libres de ellas julio y agosto) y siendo frecuentes durante siete meses al año, entre noviembre y mayo (periodo 1961-1966). Así pues, el clima en el Macizo de Peña Ubiña es de tipo Dfs según la clasificación climática de Köppen (Muñoz Jiménez, 1982, concede un clima de tipo Dfsc para los Picos de Europa).

El espacio geográfico del Macizo de Peña Ubiña diferencia claramente tres pisos bioclimáticos: montano (750-1.600 m s.n.m.), subalpino (1.600-2.000 m s.n.m.) y alpino (2.000-2.417 m s.n.m.), aunque las condiciones de cada sector pueden variar según sus características topoclimáticas, pudiendo diferir localmente la altitud límite de cada piso, a lo que hay que añadir el impacto antrópico. Al respecto de la vegetación de estas montañas existen contribuciones previas (Rivas, 1971; Carballo, 1979; Osoro et al., 2000; Ezquerro Boticario et al., 2005; González Díaz et al., 2015, 2016, 2017), aunque este espacio sigue precisando de estudios que vayan subsanando y completando las lagunas de información aún existentes. El cinturón inferior se caracteriza por extensos bosques de hayas (*Fagus sylvatica*) con un muy reducido sotobosque debido a la escasa cantidad de luz solar que estos árboles permiten que alcance el suelo, los cuales se intercalan en la parte más elevada de este piso con bosques mixtos de acebos (*Ilex aquifolium*), tejos (*Taxus baccata*) y serbales (*Sorbus aucuparia*). El ámbito subalpino está caracterizado por los pastizales abiertos de festuca (*Festucion burnatii*), cervuno (*Nardus stricta*) y centaurea (*Centaurea janeri* subsp. *babiana*), y el matorral rastrero, con retama (*Cystius sp. pl.*) y brezo (*Erica sp. pl.*). Este piso ha visto incrementado su dominio respecto al piso montano debido a la secular acción humana, que ha favorecido el pasto para la ganadería, y también con el alpino debido al progresivo aumento de las temperaturas desde las últimas fases climáticas frías, como la Pequeña Edad del Hielo. Finalmente, en el piso alpino únicamente arraigan algunas especies resistentes a condiciones de intenso frío, como las saxífragas (*Saxifraga babiana*, *Saxifraga conifera*, *Saxifraga canaliculata*, *Saxifraga paniculata*) (Rivas, 1971).

En el Macizo de Peña Ubiña históricamente se han desarrollado actividades económicas agro-silvo-pastoriles, de corte tradicional, las cuales han provocado el retroceso y clareado de las masas forestales a favor de los pastizales y los abancalamientos (estos últimos en el sector leonés). Tras un dilatado proceso de mejora del conocimiento científico durante los siglos XIX, XX y XXI, estas montañas han sido reconocidas por su patrimonio e interés histórico y natural con la declaración de protección bajo las figuras de Parque Natural (Parque Natural de Las Ubiñas-La Mesa —Asturias, 2006— y del Parque Natural de Babia y Luna —León, 2015—) y Reserva de la Biosfera (en 2004 la parte leonesa y en 2012 el sector asturiano). No obstante, en la actualidad el modelo económico tradicional está sumido en una profunda reestructuración, redireccionándose hacia el turismo rural y de montaña principalmente, lo cual está favorecido por las mejoras en las infraestructuras y el desarrollo del ocio y el deporte de montaña, así como unas condiciones socioeconómicas desfavorables para la práctica de la ganadería de montaña (González Díaz et al., 2019, 2020). Esto ha provocado, ya desde el Desarrollismo, que los núcleos de población, periféricos respecto al macizo, experimentasen un importante declive. Como ejemplo, extrapolable al resto de aldeas del entorno (Torrebarriu, Bueida, Ricao, Cortes y Ljindes), está el caso de la parroquia de Tuíza, que contaba con 363 habitantes en 1940, los cuales se han reducido a 37 habitantes censados en 2022 (Instituto Nacional de Estadística, 2022).

2.2. Métodos

La presente investigación se realizó a partir de un exhaustivo trabajo de campo efectuado entre 2012 y 2022 que consistió en el reconocimiento y catalogación de todas las formas y los procesos de modelado presentes en el Macizo de Peña Ubiña, elaborando anotaciones y esquemas sobre minutas y captando imágenes que posteriormente fueron comparadas con otras más antiguas (Archivo Fotográfico de José Ramón Lueje; Lueje, 1958) para observar la evolución del paisaje estacional e interanualmente (como en el caso del manto nival, los movimientos rápidos y lentos de ladera y/o la erosión), y las formas de modelado existentes. Asimismo, se emplearon fotografías aéreas y ortofotografías del PNOA (1996, 2003, 2006, 2009, 2011, 2014 y 2017) del entorno como complemento a la observación directa que permitieron una dilatada visión de conjunto del área de estudio. Finalmente, se detalló el trabajo con la recopilación *in situ* de topónimos, tanto los que hacían alusión a lugares, picos y valles, como los que se referían a geoformas. Todo esto permitió la realización de un minucioso inventario en el que se catalogaron formas y procesos de modelado estructural, glaciar, periglacial y nival, gravitacional, kárstico, fluviotorrencial, lacustre y antropogénico, y de cartografía geomorfológica de detalle.

La cartografía geomorfológica efectuada para todo el macizo, de la que se incluye en este trabajo un sector concreto (Figura 2), se confeccionó a partir del método RCP 77 del Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (Joly, 1997), al cual se le incorporaron adaptaciones. Para ello se empleó el programa informático CorelDraw Graphics Suite 2021 y se utilizaron como base los datos obtenidos en el campo y las ortofotografías del PNOA 2017, mientras que las curvas de nivel fueron tomadas del Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 (hojas de “Bárzana”, N.º 77-II; “Torrebarrio”, 77-IV; y “Sena de Luna”, 102-II), siendo la escala elegida para representar la cartografía la 1:10.000.

En cuanto a la metodología de evaluación de los geomorfositos, se utilizó como base la propuesta por González Amuchastegui et al. (2014) para el Parque Natural de Valderejo, la cual aplica una valoración atendiendo a factores como sus valores intrínsecos, añadidos y de uso y gestión, explicando el método con gran detalle en dicha publicación. No obstante, se ha adaptado la escala de valoración, puntuando de 0 a 10 cada tipo de valor, siguiendo la propuesta de Duval y Campo (2018), que utilizan la siguiente escala para los valores intrínsecos, añadidos y totales: 0-2 (muy bajo), 2-4 (bajo), 4-6 (medio), 6-8 (alto) y 8-10 (muy alto); y la de 0-3 (bajo), 3-6 (medio) y 6-10 (alto) para los apartados de valor de uso y gestión (divididos en nuestro caso en fragilidad y capacidad de uso, tal y como proponen Bazán (2014) y González Amuchastegui et al. (2014). Esta metodología, ampliamente usada y validada y con diversas adaptaciones, ha sido utilizada también en otros estudios (ejemplos: González Trueba & Serrano 2008; Duval & Campo, 2018; Serrano et al., 2009, 2018).

3. Resultados

Los resultados se dividirán en dos partes principales. Por un lado, se hará un inventario de todas las geoformas identificadas en el Macizo de Peña Ubiña; y, por otro, se hará una valoración del geopatrimonio, evaluando los geomorfositos potenciales dentro del área de estudio.

3.1. Formas estructurales, de modelado y antropogénicas en el Macizo de Peña Ubiña

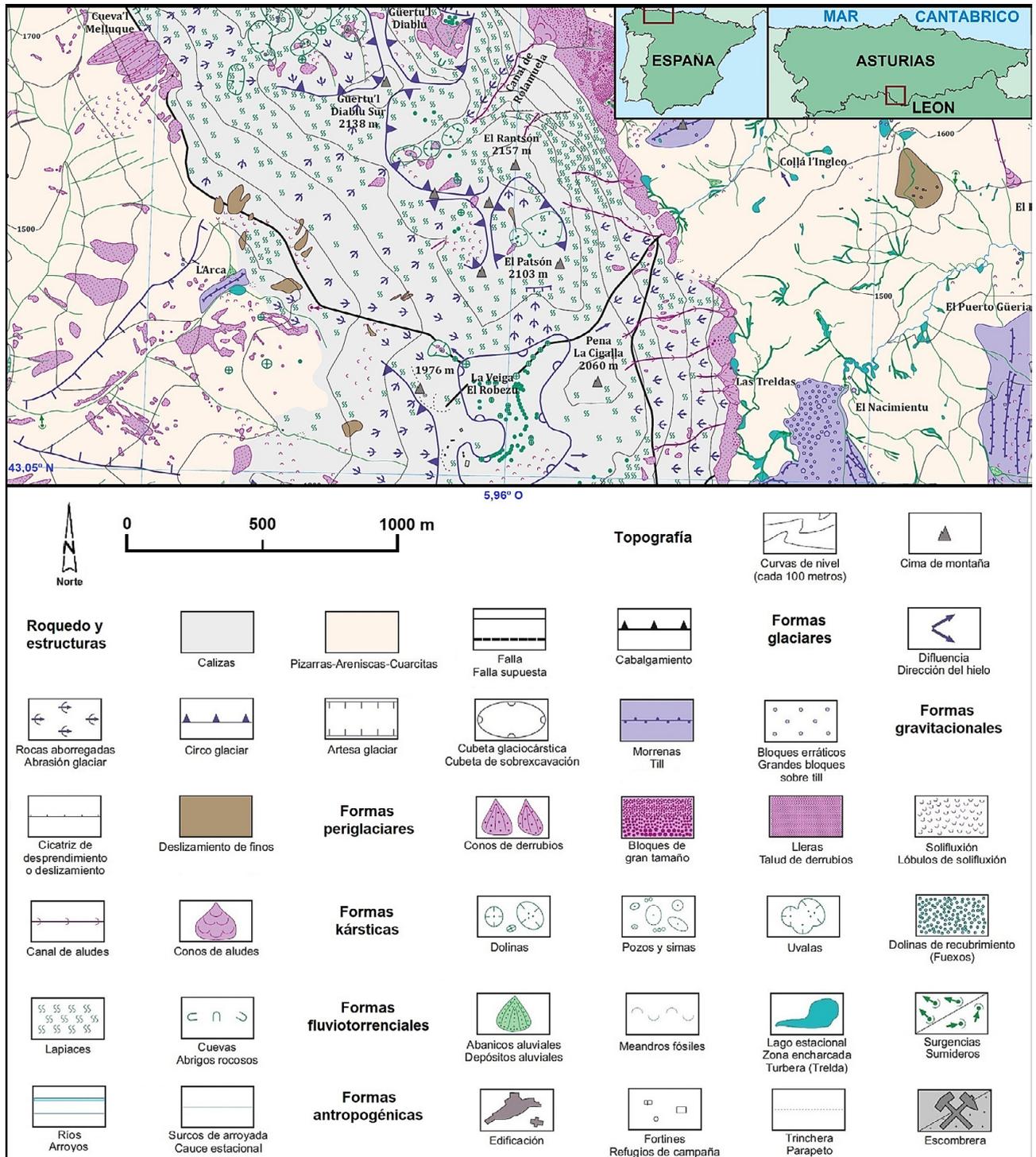
Además de estructuras geológicas de interés, el Macizo de Peña Ubiña cuenta con un amplio abanico de procesos, depósitos y formas heredadas y también plenamente funcionales de tipo kárstico, fluviotorrencial, lacustre, glaciar, periglacial y nival, gravitacional y antropogénico. A continuación, se describirán estas morfologías de gran interés desde el punto de vista patrimonial por su valor científico, su interés paisajístico y/o su rareza.

3.1.1. Formas estructurales

Entre la gran abundancia de fallas, fracturas y diaclasas presentes en este sistema montañoso cabe destacar la Falla de León, así como alguna secundaria asociada a la susodicha, la cual se configura como una prolongación de la Falla de Ubierna (Marcos, 1968b). Este agente tectónico es el principal responsable de la sobreelevación del Macizo de Peña Ubiña respecto a los conjuntos montañosos circundantes debido a un levantamiento del basamento varisco más acusado, que está asociado con un cabalgamiento profundo y a la actividad de una falla inversa asociada a la Falla de León, y no a una erosión diferencial de los materiales que montan estas montañas, pues las mismas calizas que forman las crestas de Peña Ubiña afloran en diferentes sectores del Macizo Asturiano (Alonso et al., 2007; Martínez Abad, 2007).

La actividad tectónica en el Macizo de Peña Ubiña ha dado lugar a la aparición de sinclinales y anticlinales, así como cabalgamientos y pliegues asociados, siendo importante destacar los que se extienden entre El Quempu y La Veiga Retuertu, el ubicado al sur de Tuíza Baxo y Tuíza Ribá, el de Pena Cerreo, el de Penubina la Pequena, el del Güertu'l Dieblu y el de Pena Rueda.

Figura 2. Detalle del mapa geomorfológico centrado en el entorno de El Güertu'l Dieblu



Elaboración propia

3.1.2. Formas derivadas de la karstificación

El Macizo de Peña Ubiña está constituido por potentes capas de calizas, las cuales, debido a su disposición tectónica, sobrepasan en numerosos puntos los 1.000 metros de potencia (Truyols et al., 1982). Asimismo,

las condiciones climatológicas determinan la abundancia de las nevadas en los sectores elevados (Muñoz Jiménez, 1982; Gallinar et al., 2022b), de ahí que las subsecuentes aguas de fusión provoquen una intensa meteorización y disolución de dicho roquedo, configurando un paisaje kárstico con numerosas formas de modelado características (Gallinar et al., 2021). Además, dependiendo de la altitud, el karst de Peña Ubiña puede evolucionar a expensas de la cubierta vegetal y edáfica, en cotas medias y bajas, donde se desarrolla un karst cubierto oceánico de media montaña, como sucede en los Picos de Europa (Ruiz Fernández et al., 2019); mientras que, en la alta montaña, generalmente por encima de 1.700 m s.n.n., se desarrolla un intenso karst nival. Asimismo, el sector del Güertu'l Dieblu (Figura 2), una prominente plataforma calcárea, ha evolucionado como un área de desierto kárstico; es decir, un sector caracterizado por el predominio prácticamente exclusivo de la disolución de las calizas y la percolación hídrica hacia el interior del macizo calcáreo, así como por la práctica ausencia de otros procesos y formas de modelado, de suelos y de vegetación (Gallinar et al., 2021).

Así pues, en el Macizo de Peña Ubiña se pueden identificar morfologías kársticas de pequeño, mediano y gran tamaño. Entre las morfologías de detalle se encuentran numerosos tipos de lapiaces, siendo abundantes los estructurales (ejemplos: *splitkarren*, *kluftkarren* y *clints*) y los cubiertos (ejemplos: *rundkarren*, *hohlkarren* y *kamenitzas*) en sectores de menor altitud. Por su parte, en los sectores de mayor altitud, donde abundan las aguas de fusión, son los lapiaces libres de tipo nival los que dominan el paisaje debido a la intensa corrosión de las aguas frías y cargadas de CO₂ (ejemplos: *rillenkarren*, *rinnenkarren*, *nagelbrettkarren*, *wandkarren*, *määnderkarren*), e incluso también bogaces. Entre las mesoformas kársticas abundan las uvalas, las dolinas de recubrimiento (denominadas localmente como “*fuexos*”) y los pozos nivokársticos, asociados habitualmente a debilidades estructurales. Finalmente, entre las depresiones de mayor superficie y profundidad sobresalen las cubetas glaciokársticas, de origen mixto, que pueden llegar a adquirir dimensiones hectométricas (ejemplos: La Veiga Candioñes, 68,9 ha y La Veiga Socelñares, 47,4 ha). Por su parte, el endokarst del Macizo de Peña Ubiña es uno de los más destacados de todo el Macizo Asturiano, situándose solo por detrás de los Picos de Europa en cuanto a complejidad y tamaño (Ruiz Fernández & Poblete, 2012). Así pues, existen seis cavidades exploradas con 1.000 o más metros de desarrollo horizontal y 19 con 100 o más metros de profundidad, destacando el Pozo Cuapalacio (-654 metros) y el Pozo'l Trabe Rolamuela (con dos ramales diferenciados, uno de -634 metros y otro de -626 metros) (Puch, 1998). En estas cavidades también se desarrolla un intenso modelado kárstico de detalle en el que abundan espeleotemas como: estalactitas, estalagmitas, columnas, cortinas, cascadas estalagmíticas, formas coraloides, excéntricas, gours, espeleotemas subacuáticos, sifones, galerías y salas, destacando en este sentido la Cueva'l Melluque por la gran cantidad de geofomas que alberga. El funcionamiento del endokarst y de las corrientes de agua subterráneas se puede observar en las surgencias intermitentes de Los Garrafes, de las que brota un enérgico flujo de agua cuando el acuífero kárstico se encuentra saturado, mientras que durante el estío se reduce hasta desaparecer.

3.1.3. Procesos y formas fluviotorrenciales y lacustres

Las abundantes precipitaciones y las fuertes pendientes provocan que en el Macizo de Peña Ubiña exista un gran número de corrientes estacionales que drenan las aguas del área de estudio centrífugamente a partir de cinco ríos principales: Ricao, Lñindes, Güerna, Orugu y Pinos, de régimen nivo-pluvial en sus cabeceras y pluvio-nival en los sectores de menor altitud. Estas corrientes, muy enérgicas y con gran competencia de arrastre durante el deshielo, no están presentes en los sectores más elevados, que conforman un holokarst (Cvijić, 1893), brotando aguas abajo en numerosas surgencias.

En Peña Ubiña existen dos morfologías principales derivadas de la acción fluviotorrencial, las de erosión y las de acumulación. Entre las de erosión, en los sectores con roquedo detrítico, donde abundan las pizarras y los depósitos cuaternarios, como el *till*, las aguas estacionales forman surcos de arroyada y cárcavas, como se puede observar en La Becerrera, Terreros y El Puerto Güeria; mientras que en los sectores de menor altitud, donde las corrientes son perennes, y especialmente allí donde el sustrato es calizo, se han formado valles encajados y también angostos desfiladeros, como los de La Foiz Grande y La Foiz Pequeña, de hasta 500 metros de profundidad. Asimismo, también existen tramos meandriformes, de poco recorrido en cualquier caso y en áreas de escasa pendiente, como El Puerto Güeria y La Veiga Retuertu. Finalmente, en algunos sectores concretos, con sustrato calizo y corrientes de agua intermitentes y/o permanentes, aparecen marmitas de gigante de pequeño y mediano tamaño. En cuanto a las formas de acumulación, cabe citar los conos fluviotorrenciales, los cuales abundan en sectores de media montaña con sustrato detrítico y en la desembocadura de algunos surcos de arroyada, mientras que las terrazas fluvio-glaciares únicamente aparecen en el sector de Cuespasante. En algunos casos los susodichos ríos remodelan antiguos valles y artesas glaciares donde

abundan los depósitos y arcos morrénicos, generando áreas mal drenadas donde se forman lagos, lagunas de montaña y turberas, generalmente de carácter estacional, como las de La Trelde de L̄laseiru y El L̄legu, las cuales, además del incontestable interés científico y paisajístico, constituyen el refugio de diversas especies protegidas de flora y fauna, como el *Triglochin palustris* y *Equisetum variegatum*.

3.1.4. Formas y depósitos de origen glaciar

El Macizo de Peña Ubiña conserva numerosas huellas heredadas de los 20 aparatos glaciares principales que se desarrollaron durante la Última Glaciación Cuaternaria, las cuales pueden dividirse en formas erosivas y de acumulación.

Entre las geoformas de abrasión se pueden observar microformas como estrías y acanaladuras. No obstante, son muy escasas y únicamente se conservan en cantos y bloques recientemente expuestos a la meteorización, ya que, de no ser así, la disolución kárstica rápidamente provoca un borrado generalizado de dichas geoformas. Por otro lado, las grandes formas erosivas de origen glaciar identificadas son: circos glaciares (ejemplos: El Planón, Cuapalacio, El Fuexu L̄lungu, Colines y Siega l'Abá), artesas glaciares (ejemplo: El Puerto Güeria), cubetas de sobreexcavación (ejemplos: La Veiga Socellares y El Mayéu'l L̄legu), umbrales glaciares y rocas aborregadas, estos últimos presentes en la mayoría de valles glaciares.

Respecto a los depósitos glaciares, en el Macizo de Peña Ubiña son muy abundantes, distinguiéndose cuatro tipologías: *till* sin formas definidas, morrenas, bloques erráticos y rellanos de obturación. Cabe destacar los voluminosos complejos morrénicos encontrados en sectores como La Becerrera, El Puerto Güeria, la cabecera de La Foiz Pequeña, y en general, en la práctica totalidad de circos glaciares, especialmente los de mayor desarrollo. Las morrenas a menor altitud se ubican aguas abajo de la localidad de Tuíza Baxo, descendiendo a 980 m s.n.m., correspondiéndose con la MEH. Aguas arriba de estos complejos más externos se han depositado diversos conjuntos de morrenas escalonados en altitud, evidenciando la existencia de nuevas fases de avance y estabilización de las masas de hielo, dentro ya de su retroceso paulatino hacia las áreas de cabecera. A partir de la relación morfoestratigráfica entre los diferentes complejos morrénicos se han identificado tres fases principales en la evolución glaciar del Macizo de Peña Ubiña: 1) La MEH, en la que las lenguas glaciares principales llegaron a descender ligeramente por debajo de 1.000 m s.n.m., destacando el ya mencionado complejo existente por debajo de Tuíza Baxo y el Glaciar de La Foiz Grande, que llegó a prolongarse hasta 8 kilómetros, con la paleoELA media calculada a partir del método THAR situada a 1.592 m s.n.m.; 2) la Fase Interna, con dos subfases (I y II), con frentes entre 1.250 y 1.780 m s.n.m. en la subfase I (en función de las características de cada glaciar), y la segunda subfase con frentes entre 1.460 y 1.840 m s.n.m., siendo especialmente reseñables los encontrados en Pena Cerreo y El Puerto Güeria, elevándose la paleoELA media para cada subfase a 1.716 y 1.859 m s.n.m. respectivamente; y 3) la Fase Glaciar de Altitud (también con dos subfases, I y II), con frentes situados entre 1.750 y 1.910 m s.n.m. (primera subfase) y entre 1.960 y 1.990 m s.n.m. (segunda subfase), la cual está definida por la proliferación de arcos morrénicos empotrados entre sí, como los encontrados en los circos glaciares de El Planón, Cuapalacio y El Fuexu L̄lungu, situándose la cresta morrénica a mayor altitud a 2.154 m s.n.m. y sus respectivas paleoELAs a 2.024 y 2.147 m s.n.m. Los bloques erráticos, por su parte, se ubican principalmente sobre algunos cuetos y en sectores intermedios de los valles glaciares, mientras que los rellanos de obturación son escasos, ubicándose los mejores ejemplos en el entorno de L̄laseiru y La Foiz Pequeña.

3.1.5. Procesos y formas de origen periglacial, nival y gravitacional

El Macizo de Peña Ubiña, como uno de los techos de las Montañas Cantábricas, se caracteriza por el desarrollo de los procesos y las formas de génesis periglacial y nival. En los ámbitos intermedios de estas montañas se pueden encontrar numerosas morfologías heredadas de un pasado más frío, coetáneos a la Última Glaciación Cuaternaria, ya que existen pedreras estabilizadas por debajo de los 1.000 metros de altitud, una cota muy inferior a los límites funcionales actuales. Sin embargo, en los sectores de alta montaña los procesos periglaciares son plenamente activos, desarrollándose dos cinturones según su intensidad y las morfologías que aparecen: el nivoperiglacial, por encima de 1.750-1.800 m s.n.m.; y el crionival, por encima de 2.100-2.200 m s.n.m. hasta el techo del macizo (2.417 m s.n.m.) (Gallinar et al., 2022a).

Entre los procesos identificados cabe señalar: la crioturbación, la crioclastia, la soliflucción, la nivación, los movimientos en masa rápidos y las formas heredadas del permafrost. La crioturbación, que constituye un proceso muy representativo de medios periglaciares plenamente activos, es responsable de la formación de suelos estriados y círculos de piedra por encima de 1.900 m s.n.m., donde son semiactivos, si bien la presencia

de estas geoformas de detalle aumenta a partir de 2.100 m s.n.m., pasando a ser plenamente activos. Los suelos ordenados abundan en sectores como el circo glaciar de Cuapalacio y en laderas como las de El Fontán. Por su parte, la crioclastia es responsable, junto con otros procesos, del desarrollo de conos y taludes de derrubios (localmente denominados “*laderas*” o “*lleiras*”), geoformas que ocupan gran superficie en el macizo, siendo significativos los localizados al oeste de El Farinientu, que llegan a alcanzar 650 metros de desarrollo vertical. Otro proceso plenamente activo es el desencadenamiento de avalanchas de nieve (localmente denominados “*ádenes*”), que han retrabajado y profundizado numerosos canales que desembocan en conos de aludes coalescentes en muchas ocasiones, como ocurre en El Preu l’Albu (Castañón, 1984), así como en otros puntos, como al norte y oeste de Pena Rueda y en la vertiente meridional del Siega l’Abá. Los flujos de derrubios (localmente denominados “*fanos*” o “*argayos*”) realizan igualmente una eficaz labor de transporte y redistribución de partículas en las vertientes, especialmente en los conos y taludes de derrubios, destacando los que tienen lugar en los circos de mayor desarrollo y en la cara oeste de El Farinientu. Los procesos solifluidales aparecen en laderas de moderada pendiente y abundancia de partículas finas, donde es habitual encontrar diversas morfologías, como lóbulos, terracillas y bloques aradores. Finalmente, cabe destacar el papel del manto nival en la generación y evolución de muchas de estas geoformas. En los sectores más elevados la cubierta nival perdura aproximadamente ocho meses, existiendo asimismo abundantes neveros (localmente denominados “*trabes*”), como en el caso de Cuapalacio (Gallinar et al., 2022b).

3.1.6. Formas antropogénicas y arqueológicas

Respecto a las huellas generadas por la acción del ser humano sobre el territorio se ha decidido seleccionar, por su valor patrimonial, las heredadas de la actividad agropecuaria y los vestigios bélicos de la Guerra Civil Española.

Entre las formas agropecuarias son especialmente destacables los abancalamientos, en desuso, ubicados en el sector leonés, los cuales servían para el cultivo de cereales en épocas de escasez, como así se manifiesta en documentos del siglo XVIII, como el Catastro del Marqués de la Ensenada (Thorre de Varrío y Varrío de Cubillas, 28 de julio de 1752) y en Townsend (1792). Asimismo, también abundan los corros ganaderos (estas edificaciones o construcciones de piedra seca forman parte del patrimonio inmaterial de la humanidad de la UNESCO desde 2018), como huella de la extinta trashumancia que hacían los pastores extremeños hasta estas tierras y que dejó de practicarse a mediados de la década de 1980, quedando en la actualidad numerosos ejemplos semiderruidos.

En cuanto a la herencia bélica de la Guerra Civil Española, cabe señalar que Peña Ubiña fue frente de batalla entre 1936 y 1937, quedando un amplio repertorio de formas que se conservan aún con cierta nitidez, tales como: trincheras, fortines, búnkeres, nidos de ametralladora, casamatas de hormigón armado, galerías excavadas en roca, pozos de tirador y de observación, corros de piedra con troneras y otras construcciones menos significativas aunque excepcionales por su singularidad y ubicación, especialmente en sectores como Cerreo (llamada la “Montaña China” en la cartografía bélica de la época).

3.2. Propuesta de geomorfositos

El Macizo de Peña Ubiña cuenta con un abundante y variado patrimonio geomorfológico, sin embargo, a excepción de dos sectores catalogados como LIG (“Surgencias intermitentes de Los Garrafes” y “Complejo Glaciar del Macizo de Ubiña”), no existen figuras que pongan en valor y protejan el geopatrimonio de este entorno. Así pues, se proponen los siguientes diecisiete sectores y enclaves como geomorfositos (Figura 1): 1) sistemas endokársticos del Macizo de Peña Ubiña, 2) surgencias intermitentes de Los Garrafes, 3) lagos, lagunas y turberas del Macizo de Peña Ubiña, 4) El Puerto Güeria, 5) Laseiru, 6) el valle glaciar de El Meicín, 7) Pena Cerreo, 8) Penubina la Pequena, 9) Morrenas glaciares de La Becerrera, 10) La Veiga Retuertu y La Veiga Candioles, 11) La Veiga Socelares, 12) canales y conos de aludes de El Preu l’Albu y el Siega l’Abá, 13) cimas y circos glaciares del Macizo de Peña Ubiña, 14) Pena Rueda, 15) Desfiladeros de La Foiz Grande y La Foiz Pequena, 16) plataforma calcárea del Güertu’l Dieblu, y 17) fortificaciones militares de la Guerra Civil Española del Macizo de Peña Ubiña.

3.3. Descripción y valoración de los geomorfositos propuestos

A continuación, se caracterizan los diecisiete geomorfositos identificados. La Tabla 1 contiene una valoración de cada uno de ellos, indicando sus principales características.

- 1) Los “sistemas endokársticos del Macizo de Peña Ubiña” poseen un importante desarrollo longitudinal y transversal, horadando el interior del armazón calcáreo con innumerables conductos entre los que destacan el Pozo Cuapalacio (-654 metros de profundidad y 1.194 metros de desarrollo), el Pozo'l Trabe Rolamuela (dos ramales con -634 y -626 metros de profundidad y 2.604 metros de desarrollo), la Cueva la Paré los Cinllos (-406 metros de profundidad y 1.295 metros de desarrollo) y la Cueva'l Melluque (con ~3.500 metros de desarrollo). Dichas cavidades poseen una rica diversidad de formas de detalle propias de estos complejos cavernosos, como estalactitas, estalagmitas, excéntricas, coraloideas, así como otras formas de detalle formadas a partir de la disolución y posterior deposición del carbonato cálcico en las paredes, techo y suelo de estas galerías.
- 2) Las “surgencias intermitentes de Los Garrafes” (actualmente LIG), se componen de cuatro manantiales principales a cotas de entre 970 y 870 m s.n.m. (conocidas, de mayor a menor altitud, como La Fontona, El Garrafe Viechu, La Corraína y La Faya La Mediá) de los que brota un intenso flujo de agua durante el deshielo, cuando el acuífero kárstico se encuentra saturado, permitiendo conocer su funcionamiento y sus reservas hídricas.

Tabla 1. Valoración de los geomorfositos propuestos para el Macizo de Peña Ubiña

Geomorfositos		Valores intrínseco y añadido		Valor de uso y gestión		Rasgos geomorfológicos
Propuesta de geomorfositos	Nº	Valor intrínseco	Valor añadido	Fragilidad	Capacidad de uso	Principales características
Sistemas endokársticos del Macizo de Peña Ubiña	1	7	5	2	1	Grandes simas y cuevas y abundancia de espeleotemas
Surgencias intermitentes de Los Garrafes	2	8	8	6	9	Cuatro surgencias principales
Lagos, lagunas y turberas del Macizo de Peña Ubiña	3	6	9	8	7	Numerosos humedales dispersos y de pequeño tamaño
El Puerto Güeria	4	7	8	5	6	Huellas glaciares
Llaseiru	5	6	7	5	6	Lago y morrenas
Valle glaciar de El Meicín	6	8	9	7	9	Abundancia de restos glaciares
Pena Cerreo	7	8	7	5	7	Huellas glaciares
Penubina la Pequena	8	7	6	3	4	Huellas glaciares y periglaciares
La Becerrera	9	7	7	6	8	Morrenas
La Veiga Retuertu y La Veiga Candioñes	10	6	6	7	7	Formas glaciares, karst y actividad fluviotorrencial
La Veiga Socelñares	11	6	6	5	5	Cubeta glaciokárstica
Canales y conos de aludes de El Preu l'Albu y el Siega l'Abá	12	7	6	5	3	Numerosas huellas de actividad de aludes
Cimas y circos glaciares del Macizo de Peña Ubiña	13	8	8	3	7	Formas glaciares, periglaciario, karst y paredes subverticales
Pena Rueda	14	6	7	3	6	Pliegue acostado
Desfiladeros de La Foiz Grande y La Foiz Pequena	15	7	7	3	6	Valles profundos con actividad kárstica
Plataforma calcárea del Güertu'l Dieblu	16	7	6	3	5	Desierto kárstico y diversas formas kársticas
Fortificaciones militares de la Guerra Civil del Macizo de Peña Ubiña	17	8	9	9	9	Variedad de estructuras militares de diferentes características

Elaboración propia

Figura 3. Panorámica de El Puerto Güeria desde Las Cruces de Fondos. Se observa el lago de El Ļlegu en el centro, con numerosas crestas, cordones morrénicos, y al fondo una artesa glaciar

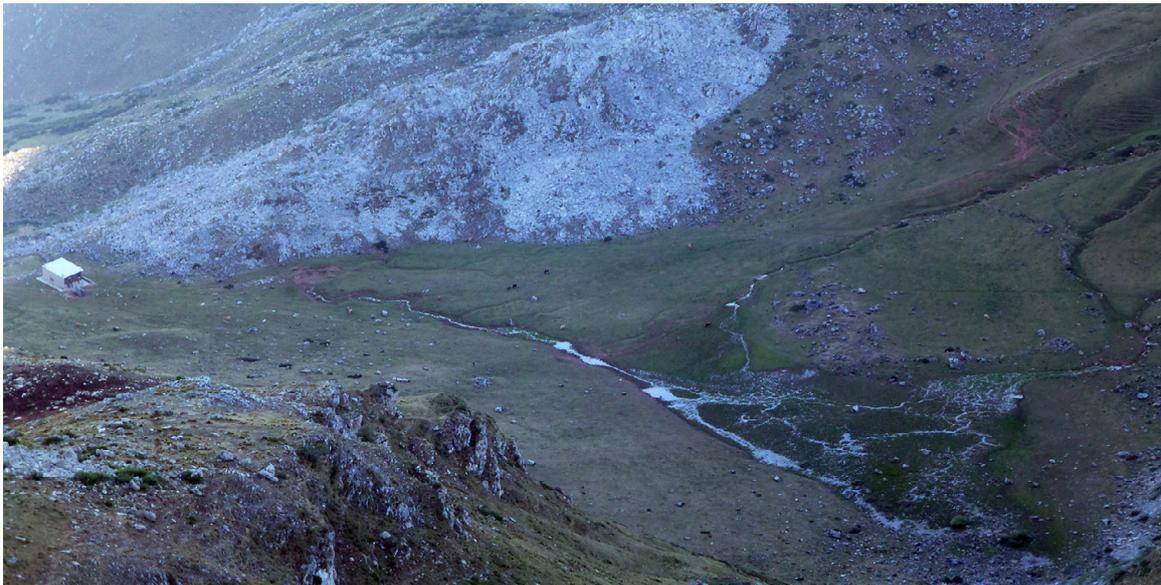


Fotografía de los autores (31 de octubre de 2013)

- 3) Los “lagos, lagunas y turberas del Macizo de Peña Ubiña” se desarrollan principalmente en sectores de media montaña, donde afloran materiales impermeables, como las pizarras, y existen arcos morrénicos bien desarrollados que ejercen de presa natural, reteniendo así una mayor cantidad de agua. Destacan por su extensión los de La Trelde de Ļlaseiru (7,1 hectáreas), El Ļlegu de El Puerto Güeria (3,2 hectáreas) (Figura 3) y El Ļlegu de El Meicín (1,4 hectáreas) (Figura 4), aunque son numerosas las pequeñas lagunas que se reparten por el resto del área de estudio (por ejemplo, en Socellares se contabilizan una veintena de ellas). Estos lagos funcionan, generalmente, como turberas encharcadas durante el estío, ya que han sido colmatadas de sedimentos tras la retirada de los hielos de la Última Glaciación, obteniendo su máximo volumen durante el deshielo, momento en el que se pueden ver los sumideros que los vacían plenamente activos, generando incluso pequeños remolinos a modo de desagüe.
- 4) “El Puerto Güeria” (Figura 3) es uno de los sectores del Macizo de Peña Ubiña con mayor geodiversidad, ya que alberga algunos de los complejos morrénicos más desarrollados, como los ubicados en el sector de El Nacimiento (Figura 2) y el tramo medio-alto de La Foiz Pequena, donde se observan voluminosos cordones morrénicos, grandes bloques erráticos y potentes paquetes de *till*. Por otro lado, este sector cuenta con algunos de los lagos y lagunas más representativos de Peña Ubiña, como El Ļlegu (Figura 3) y Ļleturbiu, así como con numerosas surgencias, ya que el sustrato predominante pasa de ser calcáreo, en los altos y cordales, a pizarroso, formando de esta manera la cabecera de numerosas corrientes de agua que desembocan en los ríos de La Foiz Grande y La Foiz Pequena. Asimismo, en la cabecera del río de La Foiz Grande se han desarrollado tramos meandriformes en sectores allanados y con suelos profundos y turbosos. Finalmente, otras morfologías que pueden observarse en el reborde de El Puerto Güeria son los conos y taludes de derrubios, así como algunos canales y conos de aludes.
- 5) “Ļlaseiru” está conformado por una braña donde destaca el lago de La Trelde, el mayor del Macizo de Peña Ubiña, el cual se ubica en una cubeta de sobreexcavación glaciar cerrada al frente por tres cordones morrénicos, donde abundan los bloques erráticos y los suelos turbosos. Este entorno, modelado en el pasado por el hielo glaciar, cuenta también con voluminosos depósitos de ladera procedentes de la plataforma del Güertu’l Dieblu, los cuales se observan desde este entorno como una verticalizada pared rocosa de entre 500 y 600 metros de desnivel.

- 6) El “valle glaciar de El Meicín” es uno de los más accesibles para el público general, ya que existe acceso rodado hasta la localidad de Tuíza Riba (1.220 m s.n.m.) y cuenta con las instalaciones del Refugio de El Meicín (1.550 m s.n.m.) (Figura 4) a dos kilómetros de distancia aguas arriba. Se trata de un valle más o menos rectilíneo con orientación hacia el oeste a través del cual se pueden distinguir las diferentes fases de la Última Glaciación, encontrando las primeras morrenas por debajo y muy próximas a la localidad de Tuíza Baxo, quedando atravesadas por la carretera local a una altitud de 1.000 m s.n.m. Por encima abundan importantes depósitos de *till* y cordones morrénicos bien definidos que marcan pulsaciones de la Fase Interna (I y II), destacando los que se encuentran en La Veiga Llonga y El Mayéu'l Llegu (Figura 4), donde se ubica el Refugio de El Meicín, al pie de unos voluminosos paquetes de *till* que cierran la cubeta de sobreexcavación glaciar de El Llegu, en la cual conflúan tres flujos de hielo desde Terreros, El Portillín y principalmente desde El Planón, un circo glaciar de 1,2 kilómetros de anchura situado entre las peñas de Penubina la Grande y El Siete.

Figura 4. El Mayéu'l Llegu. Se observa el lago con turbera de El Llegu durante el estío



Fotografía de los autores (12 de septiembre de 2013)

- 7) “Pena Cerreo” (2.112 m s.n.m.) constituye una sucesión escalonada de oeste a este de tres plataformas cabalgantes limitadas entre sí por sendas paredes rocosas subverticales y con un desnivel aproximado de 100 metros cada una. Esta plataforma se configura como un cabalgamiento menor que superpone las Formaciones Alba y Barcaliente sobre la Formación San Emiliano (Castañón, 1983; Alonso et al., 2007; Martínez Abad, 2007). Durante la Última Glaciación se desarrolló en este sector un glaciar en domo que vertía sus corrientes de hielo por varios puntos, el cual ha dejado algunos de los vestigios glaciares mejor conservados de Peña Ubiña, especialmente los que se orientan hacia El Meicín, pudiendo encontrar numerosos cordones morrénicos y huellas abrasivas, así como una artesa glaciar.
- 8) “Penubina la Pequena” (2.196 m s.n.m.) es un pliegue anticlinal cortado por varias fallas inclinadas al noroeste, siendo abierto, derecho y con inmersión fuerte (Castañón, 1983; Alonso et al., 2007; Martínez Abad, 2007). Esta peña desarrolló durante la Última Glaciación un glaciar negro con rumbo este, el cual depositó, tras su fusión, una voluminosa cantidad de bloques erráticos y *till*, marcándose en algunos tramos cordones morrénicos poco definidos. Asimismo, este geomorfosito cuenta con depósitos periglaciares y debidos a la dinámica de vertientes como así lo atestiguan las numerosas lleras, desprendimientos y deslizamientos, al igual que la dinámica solifluidal que se desarrolla en sus laderas.
- 9) “La Becerrera” (Figura 5), ubicada bajo la prominente pared calcárea de Pasumalu, contiene un conjunto de voluminosos arcos y cordones morrénicos en los que se distinguen claramente seis pulsaciones del glaciar que se desarrolló aquí durante la Última Glaciación, las cuales cierran algunos paleolagos, conformándose como uno de los restos sedimentarios glaciares más evidentes del área de estudio. Además, en la parte superior se desarrollan unas activas lleras que evidencian la actividad periglacial y nival actual (particularmente la dinámica de aludes). Las mismas huellas pueden encontrarse en la contigua ladera de Los Llanos d’El Fontán.

Figura 5. Morrenas glaciares de La Becerrera



Fotografía de los autores (24 de septiembre de 2016)

- 10) La Veiga Retuertu y La Veiga Candiollles son dos cubetas glaciokársticas de gran tamaño separadas entre sí por el umbral glaciar de L'Estrechu. La cubeta superior (La Veiga Retuertu, Figura 6) fue la cabecera de uno de los mayores glaciares que se desarrollaron en estas montañas, el cual alcanzó los 8 kilómetros de longitud (García de Celis & Martínez Fernández, 2002). Además de las formas glaciares erosivas, es especialmente reseñable el sumidero que se encuentra en su punto más bajo, el cual da nombre a este espacio y vacía las aguas de fusión que dan lugar a morfologías como las marmitas de gigante, los meandros y las zonas turbosas. Mientras que La Veiga Candiollles destaca por la gran cantidad de dolinas que se desarrollan en ella, especialmente en su cabecera, conocida como Los Foxones, las cuales son también muy abundantes en la periferia de este entorno, como en La Pena Los Foxones. Asimismo, son evidentes tres cordones morrénicos que marcaron varias pulsaciones de la fase interna (II).
- 11) La Veiga Socellares, situada al norte de la plataforma calcárea del Güertu'l Dieblu, está conformada por una cubeta glaciokárstica cerrada al frente por cuatro arcos morrénicos. En su interior abundan las trel-das (nombre local para algunas lagunas de pequeño tamaño), y una laguna con turbera, los cuales son fuente de las corrientes de agua que se sumen en el endokarst y que posteriormente desaguan en Los Garrafes. Asimismo, abundan las morfologías kársticas como los lapiaces nivales, así como las dolinas y los pozos nivokársticos.

Figura 6. La Veiga Retuertu durante el deshielo con Penubina la Pequena al fondo



Fotografía de los autores (26 de mayo de 2014)

- 12) Los “Canales y conos de aludes de El Preu l’Albu y el Siega l’Abá” han sido descritos previamente por Castañón (1984), y más recientemente se ha puesto en conocimiento su papel devastador histórico, con importantes aludes, como los acaecidos en la “Nevadona de 1888” y en años posteriores (García Hernández et al., 2018). Estas morfologías nivales se desarrollan en las laderas meridionales de las susodichas peñas, generando marcados canales que desembocan en unos amplios conos de aludes que caen en el valle de El Meicín, los cuales continúan siendo activos (Gallinar et al., 2022b). Asimismo, la nieve y su fusión también dan lugar a otras morfologías nivales y/o periglaciares, como los flujos de derrubios y las morrenas de nevero.

Figura 7. Circo glaciar de Cuapalacio



Fotografía de los autores (15 de agosto de 2018)

- 13) Las “Cimas y circos glaciares del Macizo de Peña Ubiña” se desarrollan principalmente en el cordal que discurre entre Penubina la Grande y el Colines (2.213 m s.n.m.) y en menor medida en el cordal secundario que va desde El Siete hasta El Tapinón (2.114 m s.n.m.), así como en otros sectores concretos. Estos ámbitos altimontanos se caracterizan por el desarrollo de importantes circos glaciares como El Planón, Cuapalacio (Figura 7), El Fuexu Llungu, Colines y el Siega l’Abá, caracterizados por sus verticalizadas paredes rocosas calizas, de entre 100 y 300 metros de desnivel generalmente, así como por albergar las morrenas de mayor altitud del área de estudio, pertenecientes a la fase de altitud (I y II), las cuales se distinguen por su frescura y por los numerosos cordones que se desarrollan empotrados entre sí. Asimismo, este es el ámbito del piso crionival, donde los procesos periglaciares son más intensos y se desarrollan la gelifluxión, la crioturbación y la crioclastia de forma efectiva, generando algunas de las pedreras más activas y los suelos ordenados, propios de ambientes fríos de alta montaña y de las regiones polares no glaciadas. Aparecen aquí también numerosas morfologías kársticas bien desarrolladas, como lapiaces, dolinas y pozos nivokársticos, y la nieve perdura en forma de manto continuo hasta ocho meses al año, individualizándose en neveros durante el verano, algunos de los cuales llegan a ser permanentes (Figura 7) (Gallinar et al., 2022b).
- 14) “Pena Rueda” es una voluminosa e individualizada mole calcárea situada al norte del Macizo de Peña Ubiña, la cual está caracterizada por su pliegue acostado (Figura 8), visible desde sector de El Nacimiento, en El Puerto Güeria. Hacia el norte existen hasta catorce canales de aludes, los cuales desarrollan conos de aludes a sus pies; y en la parte culminante y hacia el este, abunda el roquedo pulido, vestigio de la abrasión producida por un glaciar.

Figura 8. Vista de Pena Rueda desde El Puerto Güeria. Se observa un marcado pliegue acostado



Fotografía de los autores (3 de julio de 2015)

- 15) Los “Desfiladeros de La Foiz Grande y La Foiz Pequena”, los más profundos y angostos del área de estudio, se sumen hasta 500 metros entre las peñas circundantes de Pena Rueda y Penarpín. Durante la MEH de la Última Glaciación Cuaternaria estuvieron ocupados por sendas lenguas glaciares que confluían, llegando a formar el aparato glaciar más largo y complejo del Macizo de Peña Ubiña, con hasta 8 kilómetros de longitud. Posteriormente han sido retrabajados por el flujo del agua, que removilizó el *till*, formando importantes depósitos fluvioglaciares, y la dinámica de vertientes.
- 16) La “Plataforma calcárea del Güertu’l Dieblu”, encuadrada entre el Colines y La Veiga Socellares, es la única área de desierto kárstico presente en Peña Ubiña. Oscila entre los ~1.900 m s.n.m. y los 2.157 m s.n.m. a los que se eleva la cima de El Ranllón, por lo que está enmarcada en el ámbito periglacial activo. Las principales morfologías observadas son de naturaleza kárstica, siendo especialmente reseñables la abundancia y diversidad de lapiaces nivales y dolinas, como las albergadas en La Veiga Los Pozos y La Veiga El Robezu. Asimismo, también es reseñable la disimetría entre las vertientes asturiana y leonesa, ya que la primera se conforma como una verticalizada pared calcárea de hasta 600 metros de desnivel, siendo mucho más tendida hacia la vertiente leonesa, donde se aprecia un intenso pulido glaciar.
- 17) Las “fortificaciones militares de la Guerra Civil Española del Macizo de Peña Ubiña” no cuentan con ninguna figura de protección ni revalorización que las proteja, quedando olvidadas en los planes de protección y en los inventarios de Bienes de Interés Cultural, a pesar de que en este trabajo se les han otorgado unos valores intrínsecos, añadidos y de uso y gestión muy altos. Estos restos arqueológicos bélicos fueron generados entre 1936 y 1937 en un intenso frente de batalla que dejó numerosas huellas que retocaron estas montañas. Son especialmente numerosas las fortificaciones encontradas en el entorno situado entre el Refugio de El Meicín y La Casa Mieres, espacio que alberga cuantiosas trincheras, parapetos, nidos de ametralladora, búnkeres, miradores y fortines. Algunos de los más reseñables se hallan entre El Meicín, por toda Pena Cerreo, el sector de L’Estrechu, en la parte baja de La Veiga Retuertu, por La Llobomba y en La Veiga Rosaperu, en un tramo continuo donde no cesa la aparición de estas cicatrices en el paisaje. Asimismo, también existen cuantiosas morfologías derivadas de la acción bélica en otros sectores, como en Pena Rueda, El Fontán, Colines, la plataforma del Güertu’l Dieblu y el entorno de L’Altu Ventana.

4. Discusión

Frecuentemente, las formas de relieve y sus depósitos asociados, irremplazables en numerosos casos, no son sujeto específico de protección, e incluso es común su destrucción frente a intereses económicos, como en el caso de la estación de esquí de San Isidro, donde se ha arrasado el frente de un glaciar rocoso, o en la morrena terminal en el entorno de las minas de Piedrafita de Babia. A pesar de la creación de algunos geoparques, y de la declaración de LIGs por parte del IGME, la diversidad geológica y geomorfológica continúa careciendo de la protección y visibilización necesarias en los planes de ordenación del territorio, así como en la divulgación y explotación responsable de esta riqueza natural.

Por ello, el presente trabajo trata de revalorizar y dar a conocer el patrimonio geomorfológico del Macizo de Peña Ubiña, que constituye un enclave destacado y singular dentro de las Montañas Cantábricas al erigirse como el techo del sector centro-occidental de este sistema montañoso, siendo muy similar en los materiales en los que se arma (calizas), altitud y clima a los Picos de Europa, espacio en el que ya se han hecho propuestas previas para la protección geomorfológica (Serrano & González Trueba, 2005; González Trueba & Serrano, 2008; Bazán, 2014, 2016). Se intenta con ello aportar una herramienta para el correcto uso y gestión de este espacio, tanto a los organismos que gestionan los parques naturales y reservas de la biosfera que lo integran, como a sus habitantes y a los visitantes, a partir del inventariado de las formas y procesos existentes, y de su posterior valoración, identificando finalmente los Lugares de Interés Geomorfológico.

Los resultados, obtenidos a partir de una metodología previamente utilizada por otros autores (González Trueba & Serrano 2008; Serrano et al., 2009; Bazán, 2014; González Amuchastegui et al., 2014; Duval & Campo, 2018, Serrano et al., 2018) reflejan dicha geodiversidad, con diecisiete lugares propuestos, por lo que el área de estudio cuenta con todos los elementos para ser considerada un espacio relevante para el estudio, la conservación y la divulgación del patrimonio geomorfológico en un ámbito de alta montaña oceánica. Esto se hace más relevante debido a la creciente presión turística, la cual ha modificado sustancialmente los modelos socioeconómicos tradicionales, pasando a ser también la geodiversidad un recurso económico local a tener en cuenta, al que no obstante hay que dotar de la protección necesaria para evitar su degradación. La fácil accesibilidad a muchos puntos del macizo, y la relativa cercanía a varios núcleos urbanos (Oviedo, Gijón, León, Ponferrada, Lugo, Santander), hacen que cada vez se acerquen más visitantes, pero al mismo tiempo éstos carecen generalmente de una información geomorfológica mínima que les ayude a interpretar el paisaje. No debemos olvidar tampoco el valor didáctico y formativo de las geoformas presentes en este macizo montañoso, herencia, en el caso de las huellas glaciares que se conservan, de períodos climáticos pasados más fríos, e incluso con presencia de procesos y microformas periglaciares aún activas, propias de las grandes cordilleras y las regiones polares, como los suelos ordenados.

En los últimos años diversos autores han elaborado propuestas de lugares de interés geomorfológico en áreas próximas (Serrano & González Trueba, 2005; González Trueba & Serrano, 2008; Bazán, 2014, 2016; Beato et al., 2020) y en otros espacios de la geografía española (Serrano et al., 2006, 2009, 2018, 2020; Serrano & Ruiz Flaño, 2007; Martín Duque et al., 2010, 2012; Gómez Ortiz et al., 2012; González Amuchastegui et al., 2014; Fernández et al., 2015; Cuquejo Bello, 2016). Los efectuados en los Picos de Europa son de particular interés por su cercanía y características similares al Macizo de Peña Ubiña. En concreto, los trabajos de Serrano & González Trueba (2005) y González Trueba & Serrano (2008) proponen un total de 22 geomorfositos en el Macizo Central de los Picos de Europa, de los que 11 están relacionados preferentemente con formas de origen glaciar o glaciokárstico, cuatro con el relieve kárstico, dos con morfoestructuras, dos con formas y procesos periglaciares y nivales, y otros tres con la interrelación de diversos procesos. Posteriormente, el trabajo de Bazán (2014) retoma los 22 geomorfositos definidos en los dos citados anteriormente, e incluye 14 nuevos geomorfositos en el caso del Macizo Oriental, y otros 15 para el Macizo Occidental de los Picos de Europa. Priman nuevamente los geomorfositos relacionados con la morfología glaciar o glaciokárstica, con cuatro casos en el Macizo Oriental y siete en el Occidental, y aquellos otros focalizados en el karst, con tres y cinco geomorfositos respectivamente. En este sentido, en el Macizo de Peña Ubiña también predominan los geomorfositos relacionados esencialmente con formas glaciares o glaciokársticas (nueve casos), así como los de génesis kárstica (otros tres ejemplos), remarcando el peso que, tanto las huellas glaciares del Cuaternario como las formas debidas a la disolución de las calizas del Carbonífero, tienen en la configuración paisajística de ambos enclaves cantábricos de alta montaña.

5. Conclusiones

Este trabajo pone de manifiesto la variada geodiversidad del Macizo de Peña Ubiña, que ha sido poco estudiado hasta el momento, pese a constituir uno de los principales enclaves de alta montaña cantábrica. Tanto es así que, por sus valores ha sido declarado Parque Natural y Reserva de la Biosfera en el Principado de Asturias y en la provincia de León. Dentro de sus valores geomorfológicos más destacados es necesario citar la abundancia de depósitos y formas heredadas de origen glaciar. También cabe resaltar la existencia de una morfodinámica periglaciar y nival actual, vinculada al frío y a la evolución anual del manto nival, con la constatación de la existencia de procesos como la crioturbación, responsable de la formación de suelos ordenados (círculos de piedras y suelos estriados), así como con el desencadenamiento anual de aludes de nieve, que además de por su importante papel modelador, generan en ocasiones situaciones de riesgo en algunos puntos del macizo. La proliferación de las calizas carboníferas ha generado un desarrollado relieve

kárstico, caracterizado por ser de tipo templado oceánico en la media y baja montaña, y de tipo nival en los sectores elevados. Los ritmos de karstificación y las formas de detalle generadas difieren entre ambos tipos de karst. En cuanto a las formas fluviales, torrenciales y lacustres, destacan como formas mayores y/o más singulares los desfiladeros generados por los ríos de La Foiz Grande y La Foiz Pequeña, así como áreas turbosas y varios ejemplos de lagos de montaña. Además, también existen formas estructurales de gran relevancia como la Falla de León, y pliegues como el acostado de Pena Rueda.

A partir del inventario realizado, se han definido diecisiete lugares de interés geomorfológico que conjuntamente representan los valores geomorfológicos ya citados. De ellos, diez están focalizados principalmente en el modelado glaciar y la dinámica periglacial y nival (aunque aparecen en ellos también otras formas de modelado, principalmente kársticas), tres en las formas kársticas, una en las fluviales y torrenciales, una en los humedales, una ejemplifica pliegues y estructuras geológicas de interés, y una tiene un carácter antropogénico y arqueológico.

Las formas y los procesos citados en este trabajo, junto con la cartografía geomorfológica generada (que será publicada en una aportación específica), proporcionarán una base científica sólida que podrá ser utilizada para efectuar una gestión eficaz de este espacio natural protegido. Asimismo, el sólido conocimiento científico del Macizo de Peña Ubiña es básico para enfocar la adecuada difusión de sus valores entre un público que cada vez demanda más información sobre los valores de los espacios de montaña. Con esta contribución, nuestro equipo de trabajo inicia una nueva línea de investigación sobre geopatrimonio y, específicamente, sobre la propuesta de lugares de interés geomorfológico en el territorio asturiano, cuestión que hasta ahora ha sido poco tratada, pese a su evidente interés científico, didáctico y divulgativo.

Financiación

Esta contribución aborda parte de los temas de investigación tratados en el proyecto de investigación PID2020-115269GB-I00 (MICINN, Gobierno de España).

Referencias

- Adaro, L. & Junquera, G. (1916). Criaderos de Asturias. In *Criaderos de Hierro de España*. Memorias del Instituto Geológico de España. Tomo II.
- Adaro, L. & Junquera, G. (1926). *Atlas del estudio estratigráfico de la Cuenca Central de Asturias*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Adaro, L. (1914). *Corte horizontal estratigráfico de la Cuenca Carbonífera Central de Asturias*. (1:300000).
- Adaro, L. (1926). *Bosquejo estratigráfico de la Cuenca Central de Asturias*. (1:100000).
- Aller, J. (1981). La estructura del borde sudoeste de la Cuenca Carbonífera Central (Zona Cantábrica, NW de España). *Trabajos de Geología*, 11, 3-14.
- Aller, J. (1984). *La estructura del sector meridional de las unidades del Aramo y Cuenca Carbonífera Central*. Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias, Consejería de Industria y Comercio.
- Alonso, J.L., García Alcalde, J.L., Aramburu, C., García Ramos, J.C., Suárez, A., & Martínez Abad, Í. (2008). Sobre la presencia de la Formación Naranco (Devónico Medio) en el Manto de Bodón (Zona Cantábrica): implicaciones paleogeográficas. *Trabajos de Geología*, 28, 159-169.
- Alonso, J.L., Martínez Abad, Í., & García Ramos, J.C. (2007). Nota sobre la presencia de una sucesión cretácica en el Macizo de Las Ubiñas (Cordillera Cantábrica). Implicaciones tectónicas y geomorfológicas. *Geogaceta*, 43, 47-50.
- Alonso, V. (2014). Mapa geomorfológico del sector sur del Macizo de las Ubiñas (Cordillera Cantábrica, NO de España). *Trabajos de Geología*, 34, 125-132. <https://doi.org/10.17811/tdg.34.2014.125-132>
- Alonso, V. (2019). Geomorphology of the Ubiñas Massif, Cantabrian Mountains, NW Spain (1.22,000). *Journal of maps*, 15, 238-246. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1579763>
- Artugyan, L. (2014). Geomorphosites as a valuable resource for tourism development in a deprived area. The case study of Anina Karstic Region (Banat Mountains, Romania). *Analele Universităţii din Oradea, Seria Geografie*, 2, 89-100.
- Ballesteros, D. (2008). A Torca de los Cinchos sae do esquecemento. *Montañeiros Celtas*, 96, 46-47.
- Bazán, H. (2014). *La interpretación del patrimonio geomorfológico en los Picos de Europa: una propuesta para su aprovechamiento didáctico y geoturístico* [Doctoral thesis]. Universidad de Valladolid. <https://doi.org/10.35376/10324/6513>
- Bazán, H. (2016). Aprovechamiento didáctico y turístico del patrimonio geomorfológico a través de la interpretación del patrimonio. *XI Jornadas de Geografía Física*.
- Beato, S., Poblete, M.A., & Marino, J.L. (2020). Lugares de interés geomorfológico de la Sierra del Aramo (Macizo Central Asturiano, NW España): propuesta y evaluación. *Investigaciones Geográficas*, 101, e59866. <https://doi.org/10.14350/rig.59866>
- Brosche, K.U. (1978). Formas actuales y límites inferiores periglaciares en la Península Ibérica. *Estudios Geográficos*, 151, 131-161.
- Carballo, J.M. (1979). *Estudio de la flora y vegetación del sector norte del Macizo de Ubiña (Asturias)* [Bachelor's thesis]. Universidad de Oviedo.
- Castañón, J.C. (1983). El glaciario cuaternario del Macizo de Ubiña (Asturias-León) y su importancia morfológica. *Ería*, 4, 3-49. <https://doi.org/10.17811/er.0.1983.3-49>
- Castañón, J.C. (1984). Sobre el modelado originado por los aludes de nieve en el Prau del Albo (Alto Huerna, Asturias). *Ería*, 6, 106-112. <http://dx.doi.org/10.17811/er.0.1984.106-112>
- Castañón, J.C. (1989). *Las formas de relieve de origen glaciar en los sectores central y oriental del Macizo Asturiano* [Doctoral thesis]. Universidad de Oviedo.
- Coratza, P. & Hobléa, F. (2018). The Specificities of Geomorphological Heritage. In E. Reynard, J. Brilha (Eds.), *Geoheritage*, 87-106. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00005-8>

- Corugedo, E. (1932). La geología de la Cuenca del río Tuiza y sus reservas de energía hidráulica. In *II Congreso de la Agrupación de Ingenieros de Minas del NO. de España* (pp. 33-47).
- Cunquejo Bello, M.D.C. (2016). *La Sierra del Larouco: Inventario y valoración de geomorfositos para la sostenibilidad de un espacio rural de interior* [Unpublished doctoral thesis]. Universidade de Vigo.
- Cvijić, J. (1893). Das karstphänomen Versuch einer morphologischen Monographie. *Geographische Abhandlungen*, 5, 218-329.
- Duval, V.S. & Campo, A.M. (2018). Patrimonio geomorfológico y geodiversidad en las Sierras de Lihué Calel (Argentina). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 79, 2476, 1-24. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2476>
- Ezquerro Boticario, J., García López, J.C., & Ramírez Cisneros, J. (2005). Principales conclusiones del estudio de caracterización de los puertos pirenaicos de la provincia de León. In *Actas del IV Congreso Forestal Español*.
- Fernández, A., Ruiz Fernández, J., Gallinar, D., & García Hernández, C. (2015). El patrimonio geológico de las Hoces del Júcar (La Manchuela-Albacete): una propuesta de lugar de interés geológico (LIG). In M.S. Mendia Aranguren, A.H. Orús, M. Monge Ganuzas, E. Fernández Martínez, J. Vegas, & Á. Belmonte (Eds.), *Patrimonio geológico y geoparques, avances de un camino para todos* (pp. 55-60). IGME.
- Fernández, L.P. (1992). *Estratigrafía, sedimentología y paleografía de la región de Riosa, Quirós y Teverga-San Emiliano* [Unpublished doctoral thesis]. Universidad de Oviedo.
- Fernández, L.P. (1993). La Formación San Emiliano (Carbonífero de la Zona Cantábrica, NO de España): Estratigrafía y extensión lateral. Algunas implicaciones paleogeográficas. *Trabajos de Geología*, 19, 97-122.
- Feuillet, T. & Sourp, E. (2011). Geomorphological Heritage of the Pyrenees National Park (France): Assessment, Clustering, and Promotion of Geomorphosites. *Geoheritage*, 3, 151-162. <https://doi.org/10.1007/s12371-010-0020-y>
- Gallinar, D., Ruiz Fernández, J., & García Hernández, C. (2021). Las formas kársticas del Macizo de las Ubiñas (Montañas Cantábricas). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 43, 135-175. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2021.43.0.8858>
- Gallinar, D., Ruiz Fernández, J., & García Hernández, C. (2022a). Las formas periglaciares del Macizo de las Ubiñas (Montañas Cantábricas). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 44, 55-98. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2022.44.0.9425>
- Gallinar, D., Ruiz Fernández, J., & García Hernández, C. (2022b). La nieve en el Macizo de las Ubiñas (Montañas Cantábricas) y sus implicaciones geomorfológicas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 93. <https://doi.org/10.21138/bage.3224>
- García de Celis, A.J., & Martínez Fernández, L. (2002). Morfología glaciar de las montañas de la cuenca alta de los ríos Sil, Omaña, Luna y Bernesga: revisión y nuevos datos (Montaña Occidental de León). In J. Redondo Vega, R.B., González Gutiérrez, & P. Carrera (Eds.), *El modelado de origen glaciar en las montañas leonesas* (pp. 137-196). Universidad de León.
- García Fuente, S. (1956). Datos para el estudio geológico del Concejo de Quirós (Asturias). *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 41, 21-31.
- García Fuente, S. (1959). *Explicación del Mapa Geológico de España (1:50000), hoja 77 (La Plaza, Teverga)*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Primera serie.
- García Hernández, C., Ruiz Fernández, J., Oliva, M., & Gallinar, D. (2018). El episodio de movimientos en masa asociado a los temporales de nieve de 1888 en el macizo asturiano. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 76, 52-78. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2515>
- García Hernández, C., Ruiz Fernández, J., & Rodríguez Gutiérrez, F. (2019). El fenómeno de los aludes a través de un itinerario didáctico en la Montaña Cantábrica. *Cuadernos Geográficos*, 58(2), 126-151. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i2.7293>
- García Loygorri, A., Ortuño, G., Caride de Liñán, C., Gervilla, M., Greber, Ch., & Freys, R. (1971). El carbonífero de la cuenca central asturiana. *Trabajos de Geología*, 3, 101-150.

- Gómez de Llarena, J. (1946). Nuevos yacimientos cámbricos de la Babia Baja (León) y Teverga (Asturias). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 44, 101-111.
- Gómez de Llarena, J. & Rodríguez Arango, C. (1948). Datos para el estudio geológico de la Babia Baja (León). *Boletín del Instituto Geológico y Minero*, 61, 79-206.
- Gómez Ortiz, A., Oliva, M., Serrano Giné, D., Molero Mesa, J., Vidal Macua, J.J., Salvador Franch, F., Salvà Catarineu, M., & Plana Castellví, J.A. (2012). Geositios de interés geomorfológico en Sierra Nevada. Hacia una propuesta de valoración patrimonial. In D. Royé, J.A. Aldrey Vázquez, M. Pazos Otón, M.J. Piñeira Mantiñán, M. Valcárcel Díaz (Coords.), *Respuestas de la Geografía Ibérica a la crisis actual: XIII Coloquio Ibérico de Geografía* (pp. 1121-1135).
- Gómez Villar, A. (2006). El clima. In J.M. Redondo Vega (Dir.), *Diagnosis territorial y bases para ordenación, el uso y la gestión de los Espacios Naturales de Sierra de los Ancares, Alto Sil y Omaña (León) recientemente declarados como lugares de interés comunitario. T I, Inventario, Alto Sil (León)* (pp. 15-24), (Inédito). Convenio específico de colaboración entre la ULE y la Consejería de Medio Ambiente de Junta de Castilla y León. León.
- González Amuchastegui, M.J., Serrano Cañadas, E., & González García, M. (2014). Lugares de interés geomorfológico, geopatrimonio y gestión de espacios naturales protegidos: el Parque Natural de Valderejo (Álava, España). *Revista de Geografía Norte Grande*, 59, 45-64. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022014000300004>
- González Díaz, J.A., Celaya, R., Fraser, M.D., Osoro, K., Ferreira, L.M.M., Fernández García, F., González Díaz, B., & Rosa García, R. (2017). Agroforestry Systems in Northern Spain: The Role of Land Management and Socio-economy in the Dynamics of Landscapes. In J. Chander Dagar, V. Prasad Tewari (Eds.), *Agroforestry. Anecdotal to Modern Science*, 189-216. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7650-3_7
- González Díaz, J.A., Fernández García, F., Osoro, K., Celaya, R., & Rosa García, R. (2015). Cambios en los paisajes de montaña asociados a la cabaña ganadera y su manejo. un estudio en la Reserva de la Biosfera Las Ubiñas-La Mesa. *Tecnología agroalimentaria*, 16, 24-29.
- González Díaz, J.A., Fernández García, F., Osoro, K., Celaya, R., & Rosa García, R. (2016). Changes in mountain landscape and livestock management in northern Spain: a study in Las Ubiñas-La Mesa Biosphere Reserve (Asturias, NW Spain). *Options Méditerranéennes*, 115, 517-521.
- González Díaz, B., García Hernández, C., & Ruiz Fernández, J. (2019). *Los daños del lobo a la cabaña ganadera en Asturias: un análisis espacial*. Ediciones Trabe.
- González Díaz, B., Ruiz Fernández, J., García Hernández, C., González Díaz, J.A. (2020). La presencia del lobo ibérico (*Canis lupus signatus*) en ambientes humanizados de la Montaña Central Asturiana. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 86. <https://doi.org/10.21138/bage.2920>
- González Díaz, B., Ruiz Fernández, J., García Hernández, C., Menéndez Duarte, R., & González Díaz, J.A. (2021). Evolución glacial y morfodinámica periglacial en la vertiente asturiana del Puerto de Ventana (Montañas Cantábricas). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 43, 101-134. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2021.43.0.8841>
- González Gutiérrez, R.B., Santos González, J., Gómez Villar, A., Alonso Herrero, E., García de Celis, A., Cano, M., & Redondo Vega, J.M.^a (2017). Glaciokarst landforms in the Sierra de los Grajos, Babia and Luna natural park (Cantabrian Mountains, NW Spain). *Acta Carsologica*, 46(2-3), 165-178. <https://doi.org/10.3986/ac.v46i2-3.5001>
- González Trueba, J.J. & Serrano, E. (2008). La valoración del patrimonio geomorfológico en espacios naturales protegidos. Su aplicación al Parque Nacional de los Picos de Europa. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 47, 175-194.
- Grupo Espeleológico Polifemo (2010). *Exploración espeleológica en los Joyos de Colines, Macizo de Ubiña (NW. de España)*. Federación d'Espeleología del Principáu d'Asturies.
- Hernández Sampelayo, P. (1942). Región Noroeste-Siluriano de Asturias. In *El Sistema Siluriano. Memorias del Instituto Geológico y Minero de España. Explicación del Nuevo Mapa Geológico de España* (pp. 38-95). Tomo II.

- Instituto Nacional de Estadística (2022). Nomenclátor: Población del Padrón Continuo por Unidad Poblacional. https://www.ine.es/nomen2/inicio_r.do
- Interclub Ubiña del Colectivu Asturianu d'Espeleólogos (2013). *Memoria de exploraciones subterráneas*. Federación d'Espeleoloxía del Principáu d'Asturies. Quirós.
- Joly, F. (1997). *Glossaire de géomorphologie. Base de données sémiologiques pour la cartographie*. Armand Colin.
- Julivert, M. & Marcos, A. (1971). *Síntesis de la cartografía existente. Mapa Geológico Nacional (1:200000), hoja nº 9 (Cangas del Narcea)*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Julivert, M. (1983). La estructura de la Zona Cantábrica. In J.A. Comba (Coord.), *Geología de España. Libro jubilar a José María Ríos* (pp. 339-381). Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Llamazares, J. (2021). El Regañón: una posición avanzada republicana de media montaña en el Frente Norte (San Emiliano, León). *Revista Internacional de la Guerra Civil (1936-1939)*, 69-90. <http://dx.doi.org/10.1344/e38.v11i11.36881>
- Llopis Lladó, N. (1952). Estudios geológicos en la cuenca carbonífera de Asturias. *Boletín Informativo del Instituto Nacional del Carbón*, 2, 5-8.
- Llopis Lladó, N. (1954a). El relieve de la región central de Asturias. *Estudios Geográficos*, 57, 501-550.
- Llopis Lladó, N. (1954b). Estudio geológico del reborde meridional de la cuenca carbonífera de Asturias. *Pirineos*, 31-32, 33-177.
- Llopis Lladó, N. (1955). Sobre las tectónicas del Carbonífero de Tlledo. In *Tomo de homenaje póstumo al Dr. D. Francisco Pardillo Vaquer, 19 mayo 1884-19 julio 1955* (pp. 163-168). Universidad de Barcelona.
- Llopis Lladó, N. (1964). Sur la Paleotectonique des Asturies et ses rapports avec la moitié occidentale de la Péninsule Ibérique. *Boletín del Instituto de Estudios Asturianos. Suplemento de Ciencias*, 10, 101-150.
- Llopis Lladó, N. & Jordá Cerdá, F. (1957). *Mapa del cuaternario de Asturias. 1:250000*. Diputación provincial de Oviedo.
- Lotze, F. (1945). Zur Gliederung der Varisziden der Iberischen Meseta. *Geotektonische Forschung*, 6, 78-92.
- Lueje, J.R. (1958). *El Macizo de Ubiña (Del Puerto de la Cubilla al de Ventana)*. Tipografía La Industria.
- Marcos, A. (1968a). La Tectónica de la Unidad de La Sobia-Bodón. *Trabajos de Geología*, 2, 59-87.
- Marcos, A. (1968b). Nota sobre el significado de la "León Line". *Breviaria Geológica Asturica*, 12, 1-15.
- Marcos, A., Pérez Estaún, A., Pulgar, J.A., Bastida, F., Aller, J., García Alcalde, J.L., Sánchez de Posada, L., & Rodríguez Fernández, L.R. (1980). *Mapa Geológico de España (1:50000), hoja 77 (La Plaza, Teverga)*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Segunda serie.
- Martín Duque, J.F., Caballero, J., & Carcavilla, L. (2010). Organización de información geomorfológica orientada a la ordenación y gestión de espacios naturales. El caso de Covalagua y Las Tuerces (Palencia, España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geológica*, 104(1-4), 71-92.
- Martín Duque, J.F., Caballero, J., & Carcavilla, L. (2012). Geoheritage Information for Geoconservation and Geotourism Through the Categorization of Landforms in a karstic Landscape. A Case Study from Covalagua and Las Tuerces (Palencia, Spain). *Geoh Heritage*, 4, 93-108. <https://doi.org/10.1007/s12371-012-0056-2>
- Martín Vivaldi Caballero, M.E., Gómez Zotano, J., Olmedo Cobo, J.A., & Pezzi Ceretto, M.C. (2016). Geomorphology of the Sierra Gorda karst, South Spain. *Journal of Maps*, 12(5), 1143-1151. <https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1137790>
- Martínez Abad, Í. (2007). *Geología del área situada entre Peña Ubiña y el puerto de La Cubilla (Zona Central de la Cordillera Cantábrica)* [Master's thesis]. Universidad de Oviedo.
- Martínez Álvarez, J.A., Gutiérrez Claverol, M., & Vargas Alonso, I. (1968). Geología de la región de la Cordillera Cantábrica comprendida entre los puertos de Pajares y Ventana. *Documentos de Investigación Geológica y Geotectónica*, 7. ETSIM.

- Martínez Álvarez, J.A., Torres Alonso, M., Gutiérrez Claverol, M., & Vargas Alonso, I. (1969). Rasgos estructurales del borde occidental de la Cuenca Carbonífera Central de Asturias. *Documentos de Investigación Geológica y Geotectónica*, 10. ETSIM.
- Martínez, O. (2008). Patrimonio geológico. Identificación, valoración y gestión de sitios de interés geológico. *Geograficando*, IV(4), 233–250.
- Melón Nava, A., Merino, A., Sánchez, J.L., Santos González, J., Gómez Villar, A., & García Ortega, E. (2023). Snowfall events in the Cantabrian Mountains of northwestern Spain: WRF multiphysics ensemble assessment based on ground and multi-satellite observations. *Atmospheric Research*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106719>
- Mendoza Ontiveros, M., Umbral Martínez, M.E., & Arévalo Moreno, M.N. (2011). La interpretación del patrimonio, una herramienta para el profesional de turismo. *El Periplo Sustentable*, 20, 9-30.
- Mikkan, R. (2016). Patrimonio geomorfológico, identificación y valoración de sitios de importancia geomorfológica. In *XI Jornadas de Geografía Física*.
- Muñoz Jiménez, J. (1982). Geografía Física. El relieve, el clima y las aguas. In F. Quirós (Ed.), *Geografía de Asturias*. Tomo 1. Ayalga Ediciones.
- Nussbaum, F. & Gygax, F. (1952). La glaciation quaternaire dans la Cordillère Cantabrique (Espagne du Nord). *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 23-1, 36-48. <https://doi.org/10.3406/rgpso.1952.1334>
- Oliva, M., Palacios, D., Fernández Fernández, J.M., Rodríguez Rodríguez, L., García Ruiz, J.M.^a, Andrés, N., Pedraza, J., Pérez Alberti, A., Valcárcel, M., & Hughes, P.D. (2019). Late Quaternary glacial phases in the Iberian Peninsula. *Earth-Science Reviews*, 192, 564-600. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.03.015>
- Ortega Villazán, M.T. & Morales Rodríguez, C.G. (2015). El clima de la Cordillera Cantábrica castellano-leonesa: diversidad, contrastes y cambios. *Investigaciones Geográficas*, (63), 45–67. <https://doi.org/10.14198/INGEO2015.63.04>
- Osoro, K., Vassallo, J.M., Celaya, R., & Martínez, A. (2000). Resultados de la interacción vegetación x manejo animal en dos comunidades vegetales naturales de la Cordillera Cantábrica. *Investigación agraria. Producción y sanidad animales*, 15(3), 137-157.
- Palacio Prieto, J. L. (2013). Geositos, geomorfositos y geoparques: importancia, situación actual y perspectivas en México. *Investigaciones Geográficas*, 82, 24-37. <https://doi.org/10.14350/ig.32817>
- Pedraza Gilsanz, J. (1996). *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda.
- Peña Pérez, S.A. (2021). Rasgos morfométricos de los canchales y sus áreas fuente de la vertiente occidental del macizo de Las Ubiñas (cordillera Cantábrica, León). *Cuaternario y Geomorfología*, 35(3-4), 175-190. <https://doi.org/10.17735/cyg.v35i3-4.89830>
- Pijet Migoñ, E. & Migoñ, P. (2022). Geoheritage and Cultural Heritage—A Review of Recurrent and Interlinked Themes. *Geosciences*, 12(2), 98. <https://doi.org/10.3390/geosciences12020098>
- Puch, C. (1998). *Grandes simas y cuevas de España*. Espeleo Club de Gràcia (Ed.).
- Puerta Elorza, E. (2000). Asemeyu en los Joyos de Cueva Palacios (Macizo de Ubiña). In *III Congreso Espeleológico Internacional sobre Picos de Europa y VI Congreso Asturiano de Espeleología*.
- Reynard, E. & Panizza, M. (2005). Geomorphosites: definition, assessment and mapping. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 11(3), 177-180. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.337>
- Rivas, S. (1971). Sobre la flora y vegetación del Macizo de Peña Ubiña. *Trabajos del Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal*, 3, 47-123.
- Rodríguez Fernández, J.R. (1983). Evolución estructural de la zona cantábrica durante el Carbonífero. In C. Martínez Díaz (Coord.), *Carbonífero y Pérmico de España* (pp. 151-162). X Congreso Internacional de Estratigrafía y Geología del Carbonífero. Instituto Geológico y Minero de España (IGME).
- Rodríguez Pevida, A.R., de la Fuente, J.C., & González Suárez, J.J. (1982). Pozo La Carba. *Espeleología Asturiana*, 6, 1-10.

- Rodríguez Rodríguez, L., Jiménez Sánchez, M., Domínguez Cuesta, M.^aJ., & Aranburu, A. (2015). Research history on glacial geomorphology and geochronology of the Cantabrian Mountains, north Iberia (43-42°N/7-2°W). *Quaternary International*, 364, 6-21. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.007>
- Ruiz Fernández J. & Poblete, M.Á. (2012). Las simas del macizo Occidental de los Picos de Europa: disposición estructural, depósitos asociados y características del drenaje. *Investigaciones Geográficas*, (57), 205-223. <https://doi.org/10.14198/INGEO2012.57.10>
- Ruiz Fernández, J., García Hernández, C., & Fernández Fernández, A. (2019). La organización altitudinal de las formas kársticas del Macizo Occidental de los Picos de Europa (Montañas Cantábricas) y su interrelación con el glaciario Cuaternario y la morfodinámica periglaciaria. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 41, 153-200. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2019.41.1.58221>
- Ruiz Fernández, J., González Díaz, B., Gallinar Cañedo, D., & García Hernández, C. (2022). The glaciers of the Central-Western Asturian Mountains. In M. Oliva, D. Palacios, J.M.^a Fernández Fernández (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers. How the mountains were shaped by glaciers* (pp. 265-288). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00013-X>
- Santos González, J., Redondo Vega, J.M.^a, García de Celis, A., González Gutiérrez, R.B., & Gómez Villar, A. (2022). The glaciers of the Leonese Cantabrian Mountains. In M. Oliva, D. Palacios, J.M.^a Fernández Fernández (Eds.), *Iberia, Land of Glaciers. How the mountains were shaped by glaciers* (pp. 289-314). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821941-6.00014-1>
- Schulz, G. (1857). *Mapa Geológico de la Provincia de Oviedo*. (1:400.000).
- Schulz, G. (1858). *Descripción geológica de la provincia de Oviedo*. Imprenta y librería de Don José González.
- Serrano, E. & González Trueba, J.J. (2005). Assessment of geomorphosites in natural protected areas: the Picos de Europa National Park (Spain). *Geomorphologie: relief, processus, environnement*, 3, 197-208. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.364>
- Serrano, E. & Ruiz Flaño, P. (2007). Geodiversidad: concepto, evaluación y aplicación territorial. El caso de Tierras Caracena (Soria). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 45, 79-98.
- Serrano, E., Duque del Corral, P.J., Noël Fernández Cano, V., Gento Arranz, I., & Rello Ayuso, D. (2018). Patrimonio natural y geomorfología. Lugares de interés geomorfológico del Parque Natural Sierra de Cebollera. *Zubia*, 36, 45-81.
- Serrano, E., González Amuchastegui, M.^aJ., Ruiz Flaño, P., & González Trueba, J.J. (2009). Gestión ambiental y geomorfología: valoración de los lugares de interés geomorfológico del Parque Natural de las Hoces del Alto Ebro y Rudrón. *Cuaternario y geomorfología*, 23(3-4), 65-82.
- Serrano, E., González Amuchastegui, M.^aJ., & Ruiz Pedrosa, R.M.^a (2020). *Patrimonio natural y geomorfología: los lugares de interés geomorfológico del Parque Natural del Cañón del Río Lobos*. Ediciones Universidad de Valladolid.
- Serrano, E., Ruiz Flaño, P., Arroyo, P., & González Trueba, J.J. (2006). Lugares de interés geomorfológico. Inventario y valoración aplicada al área de Tierras Caracena (Provincia de Soria). In *Geomorfología y territorio: Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología* (pp. 963-976).
- Stickel, R. (1929). Observaciones de morfología glaciaria en el NO. de España. In *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural, Tomo XXIX* (pp. 297-313).
- Suárez Uriarte, P. (1922). Cueva-Melluque. Impresiones de una excursión. *Renacimiento*, L, 10, 109-111.
- Townsend, J.A. (1792). *A journey through Spain in the years 1786 and 1787*.
- Truyols, J., Arbizu, M., García Alcalde, J.L., García López, S., Martínez Chacón, M.L., Méndez Bedia, I., Méndez Fernández, C., Menéndez, J.R., Sánchez de Posada, L.C., Soto, F., Tuyols Massoni, M., Villa, E., Marcos, A., Pérez Estaún, A., Pulgar, J.A., Bastida, F., Aller, J., Lorenzo, P., & Rodríguez Fernández, L.R. (1982). *Memoria del Mapa Geológico de España (1:50000), hoja 77 (La Plaza, Teverga)*. IGME. Segunda serie.



Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador

Trends of land use and land cover change in the upper-middle Mira basin in Ecuador

AUTORÍA

Paúl Arias-Muñoz 

Universidad de Zaragoza, España. Universidad Técnica del Norte. Ecuador.

Miguel Ángel Saz 

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón, Universidad de Zaragoza. España.

Severino Escolano 

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza. Instituto Universitario de Ciencias Ambientales de Aragón, Universidad de Zaragoza. España.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25248>

CITACIÓN

Arias-Muñoz, P., Saz, M. A., & Escolano, S. (2024). Tendencias de cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira en Ecuador. *Investigaciones Geográficas*, (81), 155-179. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25248>

CORRESPONDENCIA

Paúl Arias-Muñoz (dparias@utn.edu.ec)

HISTORIA

Recibido: 24 mayo 2023
Aceptado: 31 octubre 2023
Publicado: 26 enero 2024

TÉRMINOS

© Paúl Arias-Muñoz, Miguel Ángel Saz y Severino Escolano

 Este trabajo se publica bajo una licencia [Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resumen

El empleo de sensores remotos junto a la información de los factores sociales propios de cada población permite el monitoreo del uso de los recursos naturales. El objetivo del presente estudio fue determinar el cambio y proyección a futuro de los usos y coberturas de suelo, y a la vez comprender, desde la perspectiva de los principales actores, los factores propulsores y subyacentes que impulsan estos cambios en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira. Para ello, se utilizaron imágenes multiespectrales, Landsat y Sentinel del año 1996, 2007 y 2018, a las cuales se les realizó un pretratamiento y tratamiento. Se efectuó una proyección de los cambios de coberturas y usos del suelo del 2018-2030 mediante el software TerrSet. Después, utilizando el método Delphi se identificaron los factores propulsores y subyacentes. Los resultados encontrados muestran que bosques y pastos presentaron una disminución sostenida, mientras que las áreas de cultivo y zonas urbanas aumentaron dentro de los periodos 1996-2018 y 2018-2030. Estos cambios se relacionan con el crecimiento urbano, agrícola, ganadero, minero y de la industria forestal; impulsados generalmente por el aumento poblacional, demanda de mercado, cambios de patrones de consumo, expansión de las carreteras e inexistencia de políticas ambientales.

Palabras clave: usos y coberturas de suelo; Markov; autómatas celulares; factores subyacentes; factores propulsores; SIG; Ecuador.

Abstract

The use of remote sensing and information on social factors specific to each population allows the monitoring of natural resource use. The main objective of this study is to determine the change and future projection of land use and land cover and, at the same time, to understand, from the perspective of the main stakeholders, the driving and underlying factors of these changes in the middle-upper Mira river basin. For this purpose, multispectral, Landsat, and Sentinel images from 1996, 2007, and 2018 have been used and pre-processed and treated. Subsequently, a forecast of land cover and land use changes from 2018-2030 has been made using TerrSet software. The drivers and underlying factors have been identified using the Delphi method. The results show that forests and pastures presented a sustained decrease, while cropland and urban areas increased between 1996-2018 and 2018-2030. These

changes are related to urban, agricultural, livestock, mining, and forest industry growth, which are generally driven by population growth, market demand, changing consumption patterns, road expansion, and a lack of environmental policies.

Keywords: land use and land cover; Markov; cellular automata; underlying factors; driving factors; GIS; Ecuador.

1. Introducción

El crecimiento demográfico a nivel mundial ha provocado un aumento considerable en la demanda de recursos biológicos, hídricos, energéticos y minerales, así como la búsqueda de nuevas tierras para la expansión de áreas urbanas y rurales. Esto ha generado que las coberturas y usos de suelo (*Land Use and Land Cover* [LULC]) presenten cambios, ya sea por la disminución de las coberturas vegetales como los bosques, páramos, praderas y matorrales; o por el aumento de espacios agrícolas, zonas residenciales y áreas sin vegetación (Herrmann et al., 2020; Shukla et al., 2018). Se estima que este cambio en el uso de la tierra ha afectado a casi un tercio de la superficie terrestre a nivel mundial en solo seis décadas (Winkler et al., 2021). Por esa razón, los análisis de los cambios de usos y coberturas de suelo son de suma importancia para monitorear y plantear una gestión sostenible de los recursos de la tierra ante las crecientes demandas del bienestar y necesidades humanas básicas.

Al momento de estudiar los cambios de LULC son varios tipos de modelos que se pueden diferenciar. A estos modelos se los clasifica en tres grandes tipologías: modelos espaciales y no espaciales; modelos dinámicos y estocásticos; y modelos deductivos e inductivos (Gallardo, 2018). Los modelos espaciales representan los cambios a través de patrones espaciales y los modelos no espaciales predicen cambios sin representación espacial (Gallardo, 2018; Iacono et al., 2015; Stevens & Dragičević, 2007). Los modelos dinámicos se pueden utilizar para desarrollar proyecciones futuras con base en procesos determinísticos, mientras que los estocásticos se centran en modelar la probabilidad de cambio en función de la incertidumbre (Henríquez Ruiz & García Azócar, 2007). Finalmente, los modelos inductivos basan su simulación en datos históricos, y los modelos deductivos centran su atención en los datos requeridos para explorar los patrones de cambio generados por teorías o reglas predefinidas que establecen la relación hombre-medio ambiente (Gallardo, 2018; Verburg et al., 2004).

En general, estos modelos pueden ser cuantitativos, cualitativos o ambos. Los modelos cualitativos se caracterizan por incorporar escenarios pasados, presentes o futuros en forma de palabras que pueden configurar imágenes, frases o esquemas que integran visiones y percepciones de actores (Gallardo, 2018). Algunos de los modelos más usados no son cualitativos, son cuantitativos estocásticos no espaciales, como los fundamentados en cadenas de Markov. Estos modelos realizan un análisis probabilístico para determinar la proyección futura en función de los cambios pasados (Iacono et al., 2015). También están los modelos cuantitativos tipo dinámicos-espacialmente explícitos que se basan en el uso de autómatas celulares, (Ulloa-Espíndola & Martín-Fernández, 2021; Yattoo et al., 2022), o aquellos que se basan en factores que impulsan cambios espaciales, como por ejemplo, el Modelo de Conversión del Uso de la Tierra y sus Efectos (CLUE, por sus siglas en inglés).

Debido a que los modelos estadísticos a menudo no son explícitos espacialmente y los modelos dinámicos son incapaces de dar cuenta del cambio real por sí mismos, se han propuesto modelos integrados de cadenas de Markov-autómatas celulares (CA-Markov), los cuales mejoran la confiabilidad de las simulaciones de cambios espaciales y temporales del uso del suelo (Gidey et al., 2017). Actualmente, para mejorar el soporte de estos modelos de LULC se integran modelos de redes neuronales artificiales, siendo el más usado el modelo basado en redes neuronales de perceptrones multicapa (MLP) (Alqadhi et al., 2021). Sin embargo, integrar modelos cualitativos al análisis del cambio de LULC pueden mejorar la comprensión de sus cambios y proporcionar una visión más holística de lo que sucede en el territorio.

La detección de cambios de usos y coberturas de suelo se realiza generalmente mediante la integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la aplicación de técnicas de teledetección que ofrecen datos de alta resolución temporal, espacial y espectral (Halmy et al., 2015). La precisión del análisis de las condiciones pasadas y presentes desempeña un papel más importante en la calidad de los cambios previstos, por lo que el uso de las imágenes satelitales mejoran la exactitud de las predicciones al proporcionar información del pasado más regular y continua (Beshir et al., 2023; Ozturk, 2015). A nivel global son varios estudios que han utilizado el modelo CA-Markov para simular los patrones de cambio de LULC (Girma et al., 2022; Halmy

et al., 2015; Mansour et al., 2020; Ramos-Reyes et al., 2021). También están las simulaciones realizadas en cuencas hidrográficas como en la cuenca del río Melaka en Malasia-Asia (Hua, 2017), en la cuenca del Mediterráneo en Marruecos-África (Beroho et al., 2023) o en la cuenca del río Prata en Brasil-América (Rodrigues Da Cunha et al., 2021). Los resultados obtenidos en estos estudios han demostrado la eficiencia de los modelos CA-Markov.

Una óptima planificación que conlleve a un uso eficiente y sostenible de los recursos naturales sólo es posible con una apropiada identificación y comprensión de los diversos factores que impulsan las transiciones de LULC (Chang et al., 2018). Las variaciones espaciales y temporales en los usos y coberturas de suelo están determinadas por diversos factores que pueden ser biofísicos, socio-económicos e incluso culturales (Lippe et al., 2011). Los factores biofísicos generalmente son estáticos y entre ellos se encuentran variables como la altitud o la pendiente del terreno (Eastman, 2006). Los factores socio-económicos generalmente se los diferencia entre dos tipos de factores: los propulsores directos y las causas subyacentes (Carodenuto et al., 2015). Los factores propulsores directos son las actividades humanas que afectan directamente el cambio de usos y coberturas de suelo (Betru et al., 2019). Mientras que los factores subyacentes, son interacciones complejas de fuerzas sociales, políticas, económicas, tecnológicas y culturales que motivan a las actividades humanas (Betru et al., 2019; Geist et al., 2006).

En Ecuador se han desarrollado pocos estudios para el pronóstico de las coberturas y usos de suelo. Los modelos desarrollados se centran en modelar los cambios de LULC, pero asociando al efecto del desarrollo de actividades humanas como propulsores directos (Herrera-Franco et al., 2022; Salazar et al., 2020; Ulloa-Espíndola & Martín-Fernández, 2021). Estos modelos proponen asociar factores económicos, sociales y ambientales con la planificación del uso del suelo mediante el uso de SIG. Un ejemplo es el caso de Salazar et al. (2020) que mediante el uso del modelo Dyna-CLUE simuló los límites del crecimiento urbano en Quito, que los explicaron como resultado del consumo de suelo natural y agrícola por la necesidad de viviendas de la población. Ulloa-Espíndola y Martín-Fernández (2021) para la misma área de estudio, la ciudad de Quito, utilizaron con éxito un modelo autómatas celular en GIS y determinaron que la expansión urbana en Quito continuará hacia las afueras de la ciudad en forma de asentamientos irregulares y de forma regular en sectores económicamente consolidados con buen acceso vial y a servicios.

En otras localidades ecuatorianas también se simuló los cambios del LULC. Herrera-Franco et al. (2022) simuló el crecimiento urbano con el modelo GIS-CLUE-S en la provincia Santa Elena, donde concluyeron que es necesario el desarrollo de estrategias para regular el futuro crecimiento poblacional producto de la expansión urbana esperada cerca de los pozos petroleros existentes. Al sur del Ecuador, Thies et al. (2014) empleó un modelo estocástico-espacialmente explícito para proyectar los cambios del LULC en la ciudad de Loja y concluyeron que hasta el año 2030 los pastizales serán la cobertura dominante y que la deforestación continuará principalmente cerca al centro urbano. Al noroccidente del país, en la cuenca del río Cayapas, Ortega Chuquín y Arias Muñoz (2022) utilizan un modelo CA-Markov para proyectar los cambios de LULC y concluyen que la deforestación y fragmentación del bosque húmedo entre los años 1982-2002 continuarán hasta el año 2022 en similares proporciones.

Los estudios de caso reportados evidencian el uso exitoso de modelos espaciales dinámicos o estocásticos en la simulación del cambio de los usos y coberturas de suelo en varios sectores de Ecuador. La cuenca media-alta del río Mira, ubicada en el norte de Ecuador, no ha estado exenta de presentar diversos problemas por los cambios pasados del LULC. Rodríguez-Echeverry y Leiton (2021) señalan que los cambios producidos de LULC en la cuenca hidrográfica entre los años 1991 y 2017 ocasionaron una pérdida y fragmentación de ecosistemas boscosos nativos; mientras que para Arias-Muñoz et al. (2023) los cambios de LULC entre los años 1996 y 2018 incrementaron la erosión hídrica del suelo.

Actualmente, en la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira no existen estudios que evalúen la dinámica temporal futura del LULC y la percepción de los actores locales sobre los orígenes de estos cambios, lo cual limita la toma de decisiones basadas en evidencias. Bajo ese contexto, el objetivo de la presente investigación fue determinar el cambio de usos y coberturas de suelo entre los años 1996-2018, simular su cambio al año 2030 y comprender desde la perspectiva de diversos actores los factores propulsores y subyacentes que impulsan estos cambios. Porque, así como es importante el uso de métodos cuantitativos para conocer el cambio de LULC, también es fundamental el empleo de métodos cualitativos para comprender las fuerzas motrices que impulsan estos cambios desde una perspectiva diferente, desde las motivaciones, percepciones y decisiones de los actores (Betru et al., 2019; Lyche Solheim et al., 2023). El empleo de métodos cualitativos permite triangular la información cualitativa y brinda una visión más reflexiva sobre las motivaciones

que impulsan el cambio de LULC, desde una comprensión más profunda de los procesos locales con la incorporación del conocimiento local o de factores intangibles como valores culturales, tradiciones o identidad (Carodenuto et al., 2015).

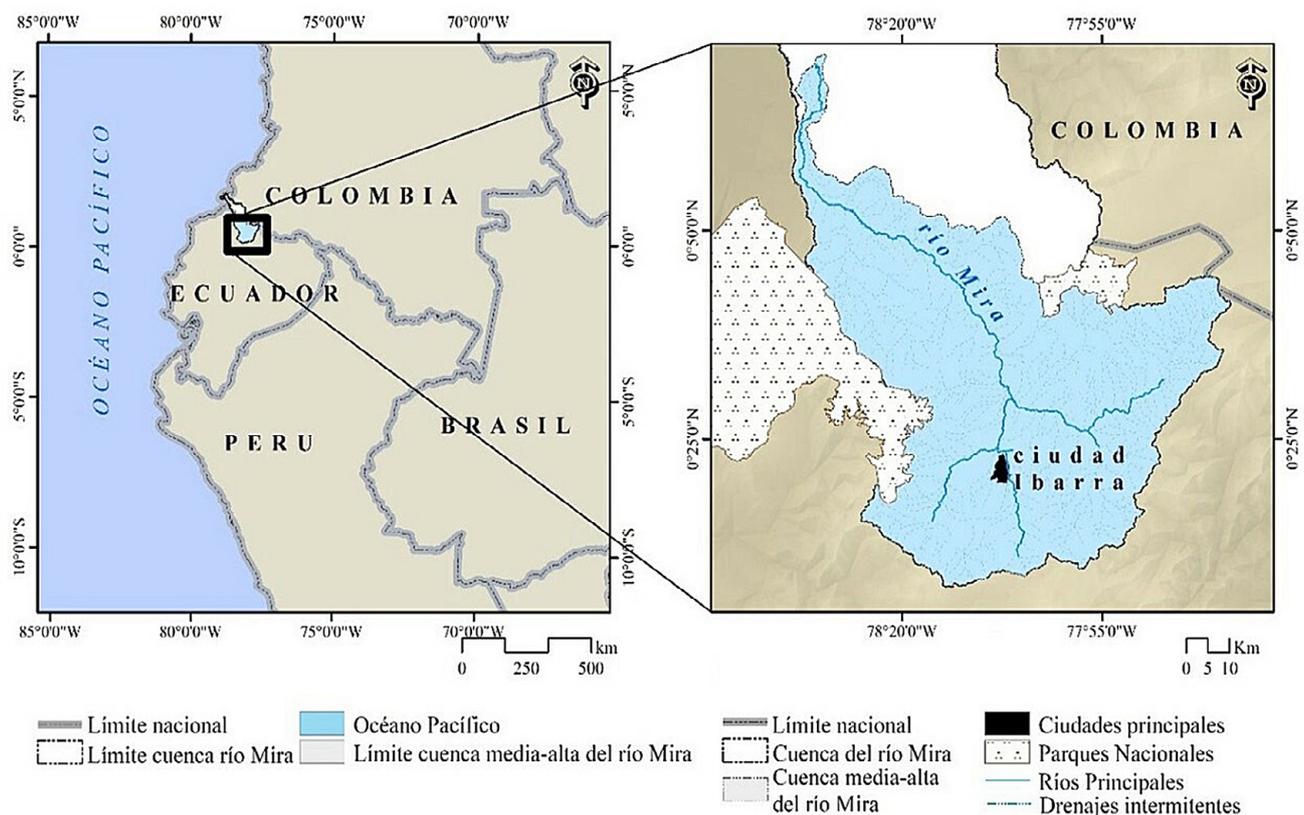
2. Metodología

2.1. Área de estudio

La investigación se limita a la sección media-alta de la cuenca hidrográfica del río Mira, ubicada en la región noroccidental de Ecuador, entre $78^{\circ}26'44''$ a $77^{\circ}46'01''$ de longitud oeste y entre $0^{\circ}11'09''$ a $0^{\circ}52'25''$ de latitud norte (Figura 1). Esta cuenca hidrográfica presenta una superficie de 5.320,87 km² y un relieve muy variado, caracterizándose por ser volcánico, colinado en sus regiones más elevadas, y desciende gradualmente en forma de laderas hasta formar valles fluviales y glaciales. El clima se caracteriza por presentar una precipitación media anual entre 3.000 y 500 mm y una temperatura que oscila entre 6 y 24°C.

Los principales centros poblados son la ciudad de Ibarra y la ciudad de Otavalo, ubicados en la sección media de la cuenca, además se ha reportado la existencia de 431 comunidades rurales distribuidas por todo este territorio. Las principales actividades económicas son la agricultura y ganadería junto al comercio y la manufactura. El aumento poblacional dentro de la región junto con el desarrollo económico ha provocado un aumento de la demanda de recursos y cambios en los patrones de consumo de los habitantes, generando el crecimiento de diversas actividades económicas como la ganadería, agricultura, minería y forestal. Estas actividades se han ido desarrollando de manera no sostenible, provocando una disminución de la cobertura vegetal y un aumento de áreas urbanas y rurales.

Figura 1. Ubicación del área de estudio



Fuente: Sistema Nacional de Información, 2022. Elaboración propia

2.2. Datos

Para el análisis del cambio de coberturas y usos de suelo, la simulación a futuro y comprensión de los factores propulsores y subyacentes se emplearon un conjunto de datos espaciales adquiridos de diferentes fuentes (Tabla 1).

Tabla 1. Datos espaciales para la aplicación del análisis de cambio de LULC y simulación futura

Nº	Tipos de datos	Fuente	Descripción
1	Modelo digital de elevación	https://earthexplorer.usgs.gov/	SRTM DEM (30 m de resolución)
2	Imágenes satelitales multiespectral	https://earthexplorer.usgs.gov/	LANDSAT 5 TM y LANDSAT 7 ETM
		https://dataspace.copernicus.eu/explore-data	SENTINEL 2 MSE con 10 m de Resolución
3	Vías	https://www.openstreetmap.org/#map=9/0.6193/-78.4753	Archivo geoespacial vías a escala 1: 50000
4	Áreas Protegidas de Ecuador	https://sni.gob.ec/coberturas	Archivo geoespacial, escala 1: 50000
5	Comunidades rurales y centros urbanos	https://sni.gob.ec/coberturas	Archivo geoespacial comunidades rurales y centros urbanos a escala 1: 50000

Elaboración propia

2.3. Adquisición, procesamiento de imágenes y validación

En esta primera etapa se utilizaron imágenes satelitales multiespectrales de los años 1996, 2007 y 2018. Estos años fueron seleccionados porque se planteó un periodo entre 10 y 12 años de simulación futura, hasta alcanzar la meta que es el año 2030. Este último año es planteado como referencial por la “Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” y sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2023). Bajo este contexto, la imagen Sentinel 2 del 2018 fue elegida porque además de que se encontraba dentro del rango de 12 años de simulación, para el área de estudio era la imagen que presentaba menos porcentaje de nubosidad. Siguiendo este criterio de temporalidad y baja nubosidad se incluyeron para el análisis imágenes de los años 1996 y 2007.

Para el año 1996, se usó la imagen capturada por el Landsat 5 TM (*Path 10/Row 59 y 60 del WRS-2*) con fecha del 8 de julio del 1996; respecto al año 2007, la imagen fue capturada por el Landsat-7 ETM (*Path 10/Row 59 y 60 del WRS-2*) con fecha del 6 de diciembre del 2007; y para el año 2018, la imagen fue brindada por el Sentinel 2B con fechas del 5 y 24 de agosto del 2018. Las imágenes fueron calibradas y corregidas atmosféricamente con ayuda del software QGIS versión 3.24.3. Luego, se realizaron las correcciones topográficas y geométricas relativas de las imágenes mediante el modelo digital de elevación de la Misión Topográfica Radar Shuttle (DEM-SRTM) con una resolución final de 30 metros. Estos datos fueron georreferenciados al área de estudio empleando el sistema de referencia WGS84, proyección UTM, zona 17 Sur. Adicionalmente, debido a que las imágenes de los satélites Sentinel presentan diferente resolución espacial a las imágenes de Landsat, se hizo un remuestreo con la ayuda del método de *neighbour joining* aumentado el tamaño del píxel a 30 metros (Astola et al., 2019).

Se realizaron clasificaciones supervisadas de LULC de los años 2018, 2007 y 1996. Para el año 2018 se utilizaron como datos de referencia 160 coordenadas reales recopiladas de Google Earth y validadas en campo. Así, se emplearon 112 coordenadas para generar la clasificación supervisada de LULC y 48 puntos de control para la validación, es decir, se usó el 70% de los datos referenciales para crear el modelo cartográfico y el 30% para la validación. El mismo número de coordenadas fueron recopiladas desde *Google Earth* para los años 2007 y 1996, tanto para el desarrollo de la clasificación de LULC como para la validación. De este modo se obtuvieron ocho coberturas de suelo: bosque, páramo, matorral, cultivos, pastos, zona urbana, cuerpos de agua y áreas sin vegetación. Esta última cobertura corresponde a espacios ocupados por roca y suelos desnudos abandonados.

La validación se realizó mediante la aplicación de los siguientes análisis estadísticos: la precisión global de clasificación (PG), la precisión del usuario (PU) y la precisión del productor (PP). La PG es el porcentaje de muestras correctamente clasificadas dentro de una matriz de confusión y se calcula dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados por el número total de píxeles de referencia (Ecuación 1) (Abdelkareem et al., 2018). La PU expresa la exactitud de comisión de la clasificación, es decir, entrega información sobre cuantas veces las observaciones clasificadas pertenecen realmente a esa clase o categoría. La PP o

la exactitud de omisión determina el porcentaje de observaciones reales de una categoría particular que fue clasificado correctamente en el mapa (Shao & Wu, 2008). Por cada cobertura y uso de suelo se determinó la exactitud de clasificación con los métodos de exactitud de productor y exactitud del usuario que fueron calculados con las Ecuaciones (2) y (3) respectivamente (Abdelkareem et al., 2018; Congalton & Green, 2019).

$$PG = \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N} \quad (1)$$

Donde, r : número de filas de la matriz, X_{ii} : es el número de observaciones en la fila i y columna i (diagonal mayor de la matriz) y N : el número total de puntos de muestreo.

$$PP = \frac{a_{ii}}{N \sum_{i=1}^n a_i^+} \quad (2)$$

$$PU = \frac{a_{ii}}{N \sum_{i=1}^n a_{+i}} \quad (3)$$

Donde a_{ii} es el número total de píxeles clasificados correctamente, a_i^+ son las columnas totales por clase i y a_{+i} son las filas totales por clases i .

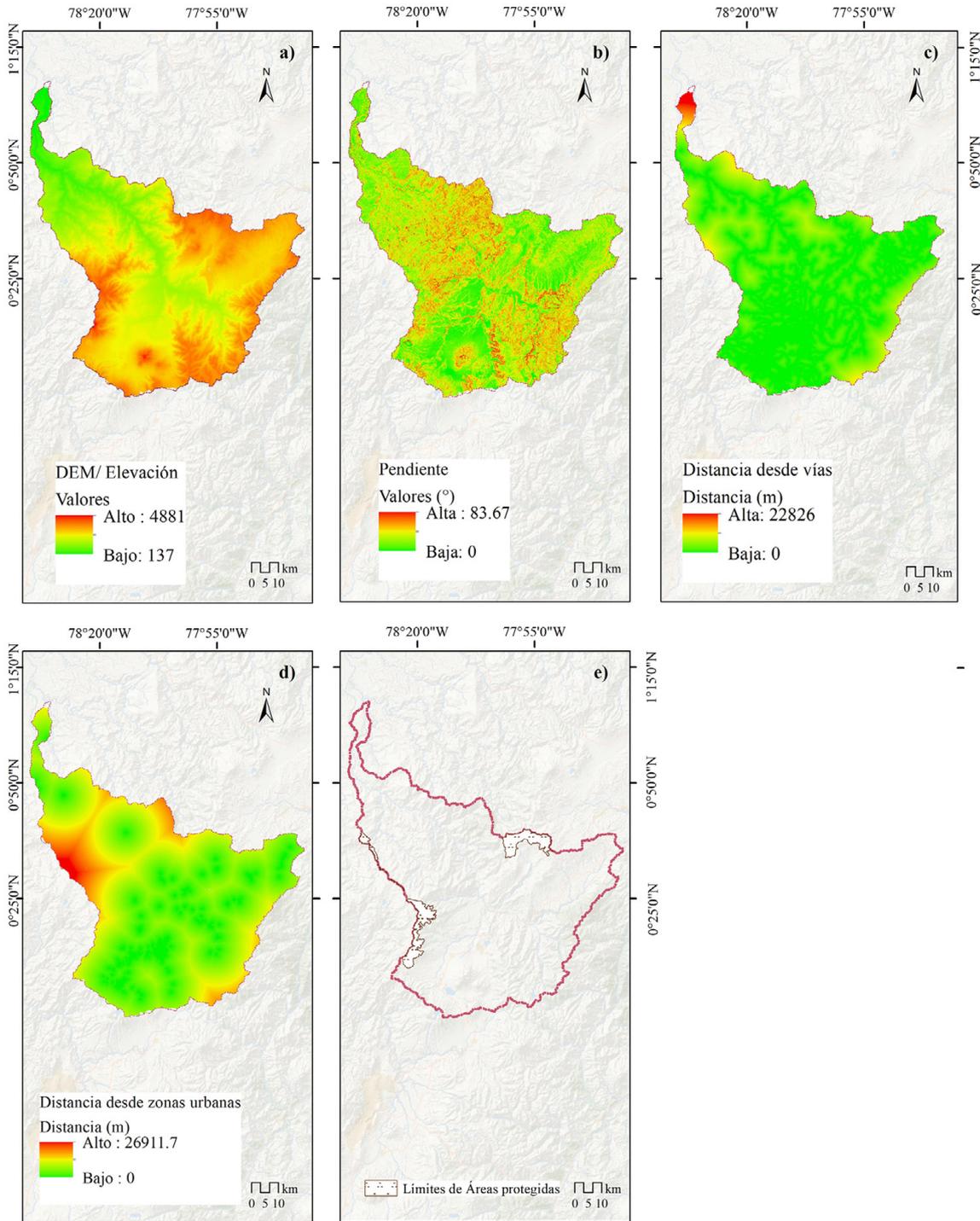
2.4. Análisis del cambio de LULC y predicción de su dinámica futura al año 2030

El simulador LCM (*Land Change Modeler*) integrado en el software *TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System* (TerrSet 2020) se utiliza para la predicción del LULC futuro con base en sus cambios y transiciones entre un tiempo 1 (T1) y un tiempo 2 (T2). Dentro del LCM se analizaron las variaciones tendenciales de los cambios de LULC para los años 1996, 2007 y 2018 con el fin de predecir los años futuros de la cuenca hidrográfica hasta el año 2030. Se seleccionaron los mapas validados de los años 1996, 2007 y 2018, e inicialmente se analizaron las probabilidades de transición entre los años 1996 y 2007 con el fin de simular la proyección al año 2018. Esta simulación fue validada con el mapa de 2018 y finalmente se proyectó el LULC al año 2030, considerando T1 al año 1996 y T2 al año 2018. Para ello, en la pestaña *Change Analysis* del LCM se crearon las ganancias y pérdidas de LULC y las tendencias espaciales del cambio.

Los escenarios futuros de uso del suelo se basaron en las tendencias recientes, la información histórica sobre las coberturas y usos de suelo y los cambios futuros previstos. Así se crearon mapas de probabilidad de cambios obtenidos por las ocho coberturas y usos de suelo estudiado entre los años 1996-2007. Luego, se usaron los datos de la probabilidad de transición de 1996 a 2007 como base para simular la LULC en 2018. El software *TerrSet* utiliza el modelo cadenas de Markov-autómatas celulares (CA-Markov), que mediante un proceso de modelado estocástico simula los cambios futuros en el tiempo a partir de los cambios pasados de varias categorías de LULC. Para predecir el cambio LULC el modelo de matriz de Markov depende de las matrices de probabilidad de transición

El CA-Markov considera las restricciones y los factores para elaborar un único mapa de idoneidad. Para definir los mapas de idoneidad se determinaron las variables explicativas espaciales de entrada o *drivers*, siendo estas de naturaleza estática, dinámica y restrictiva (Figura 2a-e). Las variables estáticas utilizadas fueron la elevación y la pendiente (derivadas del DEM-SRTM). Las variables dinámicas empleadas fueron las distancias a las vías de comunicación y distancia a las zonas urbanas. La única variable restrictiva fue las áreas naturales protegidas, con el objetivo de mantener las coberturas de estos espacios sin cambios dentro de la proyección. Estas áreas naturales protegidas son zonas que se mantendrán intactas con el pasar del tiempo, ya que se encuentran protegidas por la normativa ambiental vigente. La distancia a vías es un indicador de accesibilidad y es un factor clave para la expansión de espacios urbanos (Leta et al., 2021). Como complemento, se encuentra la distancia a las zonas urbanas, porque cuanto más cerca se encuentren de estos espacios, más fácil es la conversión de coberturas cercanas a un uso urbano (Gharaibeh et al., 2020). La elevación y la pendiente son factores topográficos que afectan al cambio de LULC, debido a que la ganancia de zonas urbanas y agrícolas se concentran en gran medida en las pendientes relativamente planas y la deforestación disminuye con el aumento del gradiente de la pendiente (Wang et al., 2021).

Figura 2. Mapas de idoneidad a) elevación, b) pendiente, c) distancias a las vías de comunicación, d) distancia a las zonas urbanas, e) áreas naturales protegidas



Fuente: OpenStreetMap (2021), Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (2021), Sistema Nacional de Información (2022). Elaboración propia

A continuación, se identificaron las variables explicativas espaciales que intervinieron en el modelo de transición a través de la prueba de V de Cramer incorporada en el software TerrSet. La prueba V de Cramer se utiliza para determinar la influencia de las variables explicativas en el cambio de coberturas y usos de suelo. Para ello, se evalúa el nivel de significancia y la correlación entre los dos grupos de variables (Beshir et al., 2023). La fuerza de influencia de las variables en la transición de coberturas es considerada aceptable, si los valores obtenidos en la prueba V de Cramer oscilan entre 0,15 y 0,4; si son superiores a 0,4, son considerados buenos (Eastman, 2006). Además, de las variables biofísicas, se consideraron las variables obtenidas en análisis de probabilidad de cambio entre 1996-2007 para su análisis de idoneidad en el modelo.

Después, se empleó el método de perceptrón multicapa (MLP [*Multi-Layer Perceptron*]) para simular el LULC al año 2018. El módulo LCM integra tres métodos diferentes para generar mapas potenciales de transiciones, los cuales se basan en sub modelos individuales y en variables explicativas asociadas (Eastman, 2006). El rendimiento de MLP es mejor a los otros métodos integrados porque es una red neuronal que puede modelar la relación entre el cambio no lineal del suelo y las variables explicativas, con información de una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida.

Finalmente, el resultado obtenido de esta proyección se validó con la información cartográfica del LULC desarrollado para el 2018 (el mapa con datos reales). De esta comparación se obtienen las pérdidas (*misses*), hits (*aciertos*), falsas alarmas (*false alarms*) y los fallos (*wrong hits*). Las pérdidas se producen cuando el mapa real muestra cambio, pero la simulación muestra persistencia. Los aciertos son obtenidos como cuando el mapa real y la simulación muestran cambios. Los fallos se producen cuando el mapa real presenta cambios y la proyección presenta cambios, pero estos son asignados en la categoría incorrecta. Las falsas alarmas son producto de que la persistencia del mapa real no coincida con los cambios del mapa simulado.

Para determinar la concordancia global entre los mapas observados y los simulados, se calculó la Figura de Mérito (*Figure of Merit*, [FoM]) según la ecuación (4). La Figura de Mérito evalúa la superposición o traslape entre las transiciones (Pontius et al., 2008). El FoM examinó cómo el cambio simulado al año 2018 desde un año real, 1996, se superpone sobre un cambio de referencia entre datos reales entre 1996-2018. Un valor de mérito del 0% significa que no hay superposición, mientras que un valor del 100% representa un solape perfecto (Moradi et al., 2020). Para el presente estudio, el cambio de referencia fue desarrollada.

$$\text{FoM} = \frac{B}{A+B+C+D} * 100 \quad (4)$$

Donde, FoM es la figura de mérito, B son los aciertos, A son las pérdidas, C son los fallos, y D son las falsas alarmas.

A la vez, también se evaluó la precisión del modelo, utilizando la comparación entre los mapas del 2018 T2-simulado y 2018 T2 referencial (Pontius et al., 2008; Pontius & Millones, 2011). Los dos parámetros que resultan de esta comparación son, el desacuerdo de cantidad (*quantity disagreement* [QD]) que se produce cuando la clasificación no coincide en términos de cantidad, ya el número de celdas de una categoría determinada en el mapa simulado difiere con el número de celdas de la misma categoría en el mapa de referencia; y, en segundo lugar, el desacuerdo de asignación (*disagreement allocation* [AD]) que se produce cuando la ubicación espacial de una categoría de suelo en un mapa simulado es diferente a la ubicación espacial de esa misma categoría en el mapa de referencia. Estos parámetros se calcularon con las ecuaciones (5) y (6) planteadas por (Pontius & Millones, 2011).

$$\text{AD} = \frac{\sum(2 * \min(\frac{n_{+i}}{n} - \frac{n_{ii}}{n}, \frac{n_{i+}}{n} - \frac{n_{ii}}{n}))}{2} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{QD} = \frac{\sum|\frac{n_{+i}}{n} - \frac{n_{i+}}{n}|}{2} \times 100 \quad (6)$$

Donde, n_{ii} es el número total de píxeles clasificados correctamente, a_i^+ son las columnas totales por clase i y a_{+i} son las filas totales por clases i .

Finalmente, una vez comprobada la capacidad de predicción del modelo entre los periodos de 1996 y 2007 para 2018, se repitió el proceso de simulación para proyectar el mapa al 2030 utilizando los mapas clasificados de 1996 y 2018 como T1 y T2. Esto se realizó para evitar las inconsistencias temporales que, según Verburg et al. (2011) sucede cuando no considera un tiempo de análisis similar bajo iguales estándares y métodos, ocasionando que las incertidumbres se acumulan y las predicciones se tornan menos precisas. Por ello, el tiempo de transición simulado entre T2 y T3 estará contenido en el tiempo de transición analizado entre T1 y T2.

2.5. Identificación de los agentes, factores propulsores y causas subyacentes

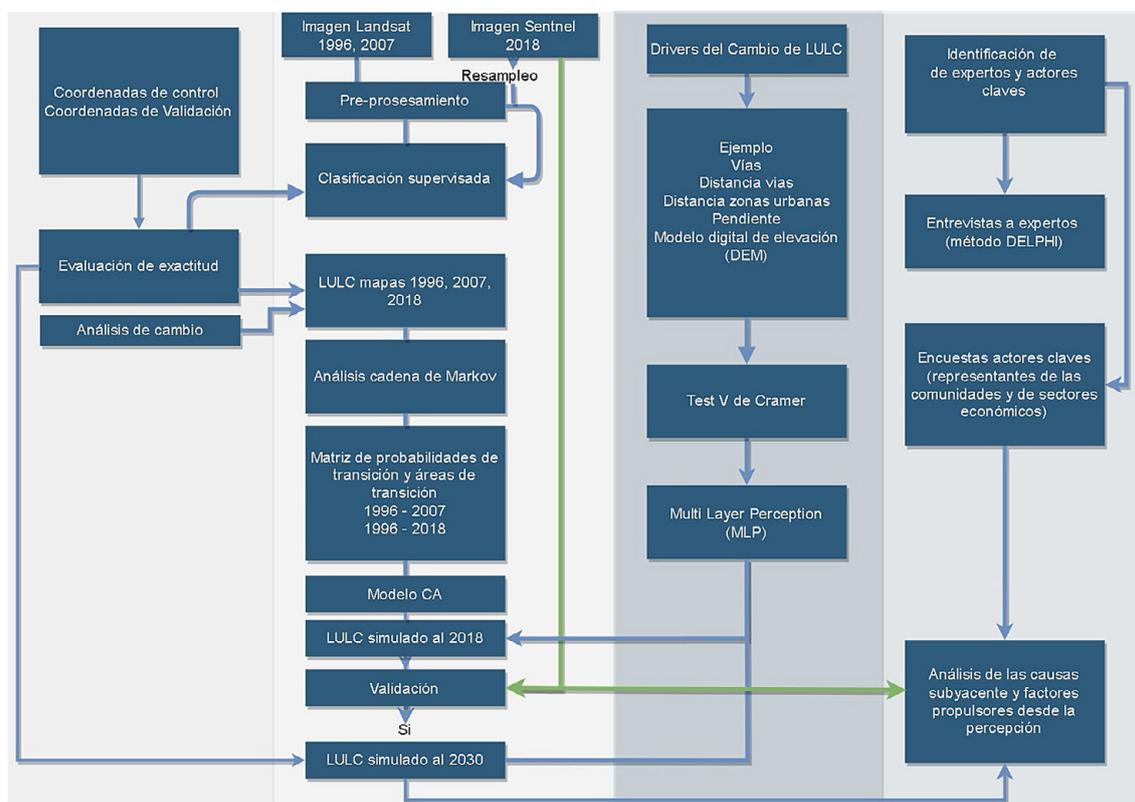
En esta segunda etapa, con el propósito de comprender los factores propulsores y causas subyacentes de los cambios LULC, pero desde la perspectiva de los agentes o actores, se aplicó una metodología cualitativa. En primer lugar, se seleccionaron a seis expertos en la temática con el fin de aplicar el método Delphi. Este es un método cualitativo estructurado que busca llegar a un acuerdo general de un grupo de expertos sobre un

problema o tema específico, mediante la recolección sistemática de información (García Valdés & Suárez Marín, 2013; Linstone et al., 1975). El criterio para seleccionar a los expertos fue tener publicaciones académicas en el área del conocimiento o haber participado en el desarrollo de informes técnicos para la zona norte de Ecuador (para organismos gubernamentales o no gubernamentales) en la temática. Después se realizaron entrevistas presenciales y virtuales a los expertos, en donde se solicitó identifiquen las actividades y factores que propician el cambio de LULC, así como a los principales actores económicos del cambio de LULC.

La información recopilada fue presentada a los expertos en una segunda ronda de entrevistas, realizadas de manera virtual, con el propósito de alcanzar un consenso sobre los factores y actores del cambio de LULC. Como consecuencia se recibió una retroalimentación y en una tercera ronda de entrevistas virtuales se alcanzó un acuerdo entre los expertos y se definieron los actores o agentes de cambio de LULC, sus tipos de escalas y una lista de chequeo de los probables factores directos y subyacentes del cambio del LULC. A continuación, con base en la información recabada se diseñó una entrevista para ser aplicada a los agentes o actores. En el instrumento se planteó una pregunta para evaluar la comprensión sobre el cambio de uso y así evitar confusiones en la temática. A cada actor se solicitó que identifique los factores propulsores directos y subyacentes del cambio de LULC en su área geográfica o en su sector económico.

Estos factores fueron planteados dentro del instrumento en relación con lo propuesto por los seis expertos entrevistados anteriormente. Los agentes o actores fueron clasificados en agentes de pequeña escala, representados por habitantes/colonos de las comunidades rurales, y agentes de mediana escala, que englobaron representantes de pequeñas asociaciones o de cámaras de producción por sector económico (Carodenuto et al., 2015). Los agentes de pequeña escala fueron seleccionados mediante un muestro probabilístico, entre las 431 comunidades rurales presentes, y los agentes de mediana escala fueron seleccionados empleando un muestro no probabilístico intencional. Así, se entrevistaron a 73 representantes de comunidades rurales y a 24 representantes de actores privados clasificados por sector económico. La implementación de las entrevistas y recopilación de datos fue durante el segundo semestre del 2021. Para la identificación de los factores propulsores directos se trianguló la información entre lo manifestado por el grupo de expertos y por los actores entrevistados. En cambio, las causas subyacentes fueron definidas acorde a las respuestas de cada actor entrevistado. Finalmente, en la Figura 3 se presenta un esquema metodológico en el que se integran todas las etapas desarrolladas en la presente investigación.

Figura 3. Esquema metodológico



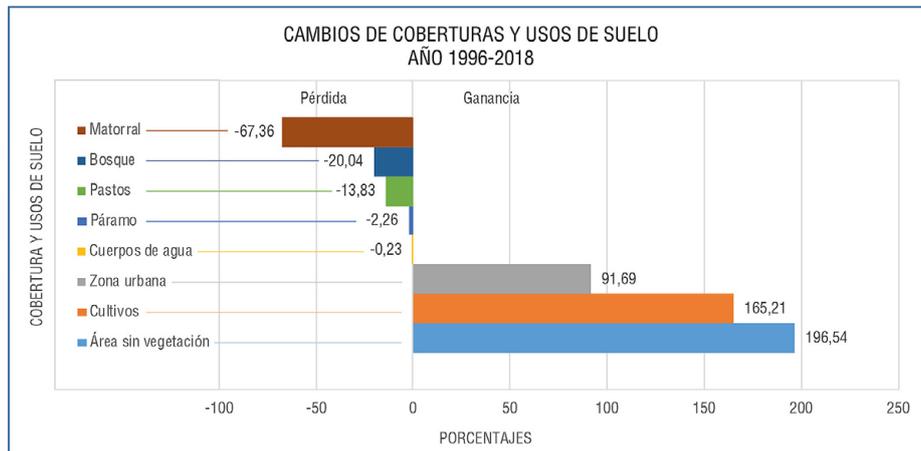
Elaboración propia

3. Resultados

3.1. Cambio del uso y cobertura de los suelos

Entre los años 1996-2018 existió una tendencia a ganar en coberturas antrópicas y pérdida en coberturas naturales (Figura 4). Se observa que para el año 2018 los bosques cubren una superficie de 1.562,19 km², disminuyendo en un 20,4% respecto al año 1996. Los matorrales fueron reducidos aún más que los bosques, al perder 67,36% de su superficie.

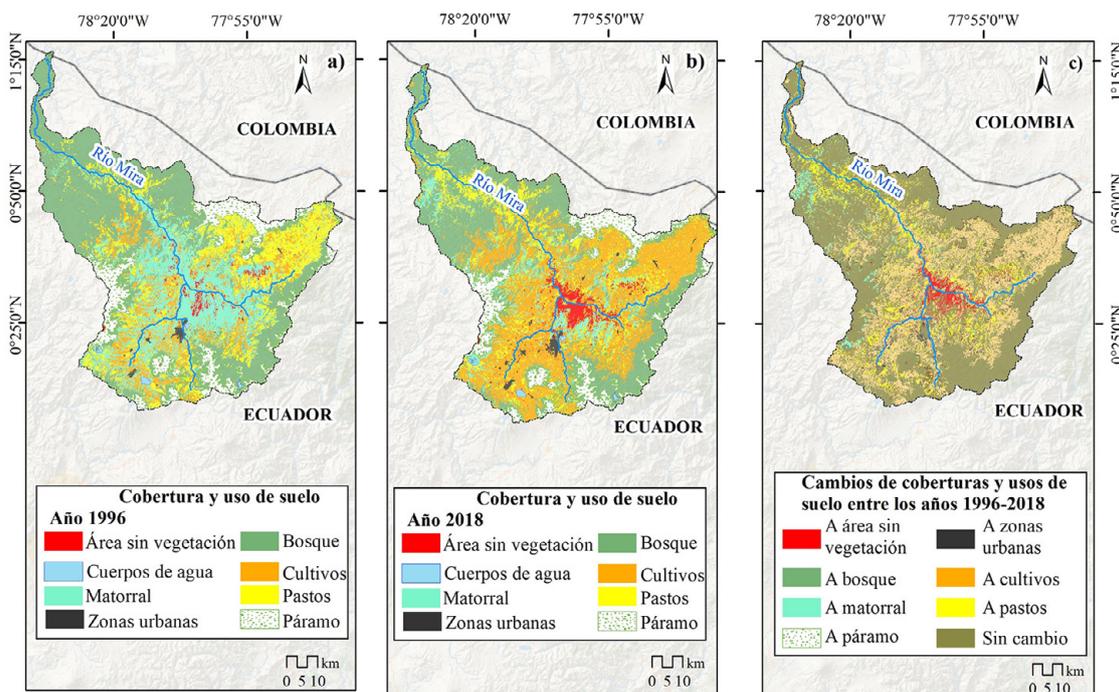
Figura 4. Cambios en las coberturas de suelo del 1996 al 2018



Elaboración propia

Al contrario, las coberturas de áreas sin vegetación y cultivos son las que más se expandieron, al aumentar su extensión en un 196,54% y 165,21%, respectivamente. Los centros urbanos también se incrementaron y casi duplican su superficie al pasar de 24,04 km² en 1996 a 46,08 km² en 2018 (Figura 4). Otras coberturas como los pastos y páramos disminuyeron sus superficies en un 13,83% y 2,26%, respectivamente durante este periodo, sin embargo, esta disminución es mucho más baja que el resto de las coberturas. Por lo tanto, se observa persistencia de coberturas en la cuenca hidrográfica normalmente al sur-oeste, oeste y este de la cuenca y considerables transiciones en el centro de la cuenca (Figura 5a-c).

Figura 5. LULC y sus cambios entre 1996 y 2018. a) LULC del año 1996, b) LULC del año 2018, c) transición de los cambios de cobertura de suelo entre 1996 y 2018



Elaboración propia

Los valores de precisión global (PG) de la clasificación del LULC para los años 1996, 2007 y 2018 fueron 83,33%, 91,62% y 85,41% respectivamente. En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos en la exactitud de productor (EP) y exactitud del usuario (EU) para cada cobertura durante los tres años. En todos los años, los resultados revelaron excelentes EP y EU tanto para cuerpos de agua como para zonas urbanas. Estos valores perfectos de productor (EP) significan que para estos casos no existieron valores de omisión, por lo cual los porcentajes reales de ambas coberturas fueron clasificados correctamente. Los valores perfectos del usuario, por su parte, confirman que el 100% de las observaciones clasificadas pertenecen realmente a esa clase. Sin embargo, pastos, matorrales, cultivos y páramo son las únicas coberturas que no alcanzan valores superiores al 80% de EU o EP en alguno de los tres años analizados. Esta condición se produce por la similitud espectral existente entre pastos y cultivos, pastos y páramo y entre matorral y bosque. De hecho, en el año 1996 se observa que la exactitud del usuario es diferente en bosques, matorral, pastos y cultivos. Otras razones de las diferencias encontradas en EP y EU en las clases podrían deberse primero a la resolución espacial de las imágenes y segundo a posibles cambios en los puntos de control del suelo por categoría, que podrían haberse clasificado como incorrectos.

Tabla 2. Resumen de la evaluación de las exactitudes del productor y del usuario para la clasificación supervisada del LULC durante los años 1996, 2007 y 2018

Año	1996		2007		2018	
Cob*	Exactitud Productor (%)	Exactitud Usuario (%)	Exactitud Productor (%)	Exactitud Usuario (%)	Exactitud Productor (%)	Exactitud Usuario (%)
1	85,72	100	85,71	100	85,71	100
2	100	83,33	100	100	100	100
3	100	100	100	100	100	100
4	50	75	66,67	100	45,45	100
5	75	100	100	100	100	100
6	50	50	75	60	100	33,33
7	100	63,64	100	81,82	100	62,50
8	100	100	100	100	100	100

*Coberturas y usos de suelos, 1: Área sin vegetación, 2: Bosque, 3: Cuerpos de agua, 4: Cultivos, 5: Páramo, 6: Pastos, 7: Matorral, 8: Zona urbana. Elaboración propia

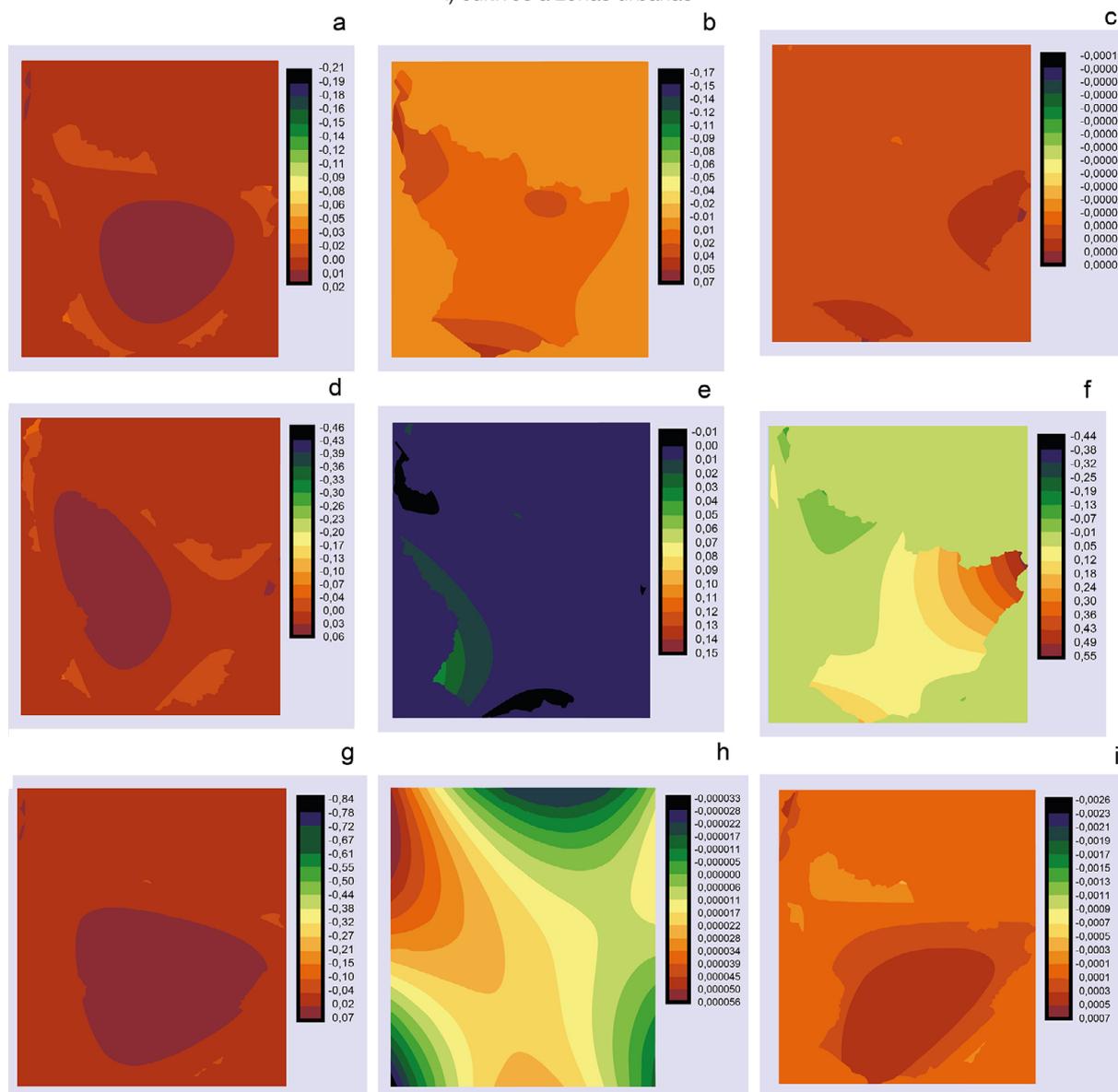
3.2. Simulación del cambio de LULC mediante el modelo de análisis de cadenas de Markov (CA-Markov)

La proyección de las coberturas y usos de suelo (LULC) en 2018 con el empleo del modelo CA-Markov fue posible gracias a los LULC observados en 1996 y 2007. Inicialmente, se crearon nueve mapas de probabilidad de cambios obtenidos por las ocho categorías de suelo estudiadas entre estos años (Figura 6). Para el suelo urbano se obtuvieron dos mapas de probabilidad debido a que las transiciones desde matorral y cultivos son similares e igual de considerables.

Se simuló el LULC al 2018 considerando como variables explicativas espaciales únicamente aquellas que obtuvieron un valor de V de Cramer superior a 0,1 (Tabla 3). Además de las variables biofísicas como, modelo de elevación o pendiente se integraron las 9 variables obtenidas en el análisis de probabilidad de cambio, de las cuales únicamente 5 fueron aceptadas junto a todas las variables biofísicas (Tabla 2). El valor de significancia para estas variables fue menor al 0,01%. Después las áreas de coberturas y usos de suelos simulados se utilizaron para asociar el uso actual real del suelo en la cuenca con el fin de validar la previsión de LULC realizada por el modelo CA-Markov. A continuación, se evaluó el rendimiento del modelo mediante el índice Kappa comparando el LULC 2020 observado y simulado.

Finalmente, para el año 2018, se construyeron cartografías de LULC reales y simulados. Como resultado, los cuerpos de agua y las zonas urbanas, principalmente, se mostraron similares en los mapas reales y simulados del año 2018, mientras que en otras clases de LULC sólo se observaron cambios menores (Figura 9). Con el fin de validar el modelo, se ha obtenido un traslape en la transición real (1996 real-2018 simulado) y la transición simulada (1996 real-2018 simulado) del 71,36%, de acuerdo al valor de FoM. Además, los valores totales de QD, y AD son 12,5 %, y 4,16 %, respectivamente. Estos resultados indican que el modelo CA-Markov empleado puede utilizarse para predecir futuros cambios en el uso del suelo.

Figura 6. Mapas de probabilidad. a) matorral a áreas sin vegetación, b) bosque a cultivos, c) cuerpos de agua a cultivos, d) cultivos a pastos, e) páramo cultivos, f) pastos a cultivos, g) matorral a cultivos, h) matorral a zonas urbanas, i) cultivos a zonas urbanas



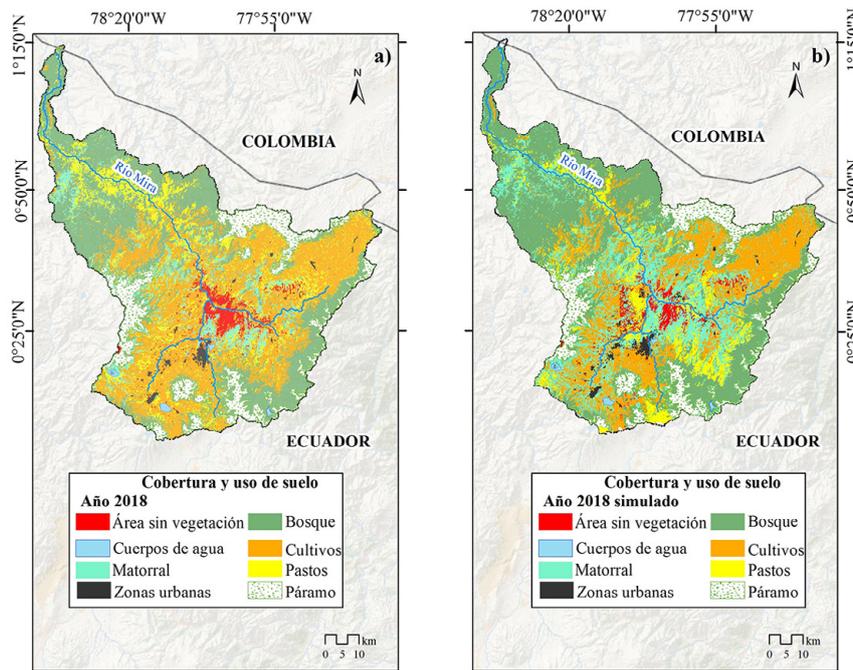
Elaboración propia

Tabla 3. Análisis de la prueba V de Cramer

Variables	Test V Cramer
Modelo de elevación	0,4716
Pendiente	0,3778
Distancia a zonas urbanas	0,2883
Distancia desde vías	0,3778
Cultivos a áreas sin vegetación	0,3320
Bosques a cultivos	0,2821
Páramo a Cultivos	0,2810
Matorral a cultivos	0,2943
Cultivos a zonas urbanas	0,2643
Matorral a zonas urbanas	0,2600

Elaboración propia

Figura 7. LULC en la cuenca hidrográfica. a) LULC real del año 2018, b) LULC simulado del año 2018

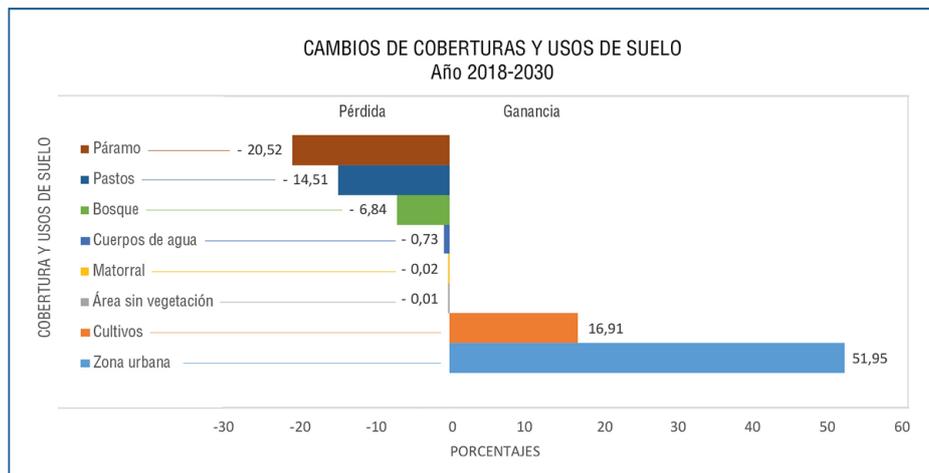


Elaboración propia

3.3. Proyección de los cambios de cobertura al 2030

En los escenarios proyectados del 2018 al 2030 también existió ganancia en las coberturas antrópicas y pérdida en coberturas naturales, al igual que el periodo 1996-2018 (Figura 8). Esta proyección evidencia que los centros urbanos y las áreas de cultivos son las únicas coberturas que presentan un crecimiento positivo hasta el año 2030. Por otro lado, se observa una estabilización en los cambios de las coberturas de áreas sin vegetación y los matorrales respecto al periodo 1996-2018.

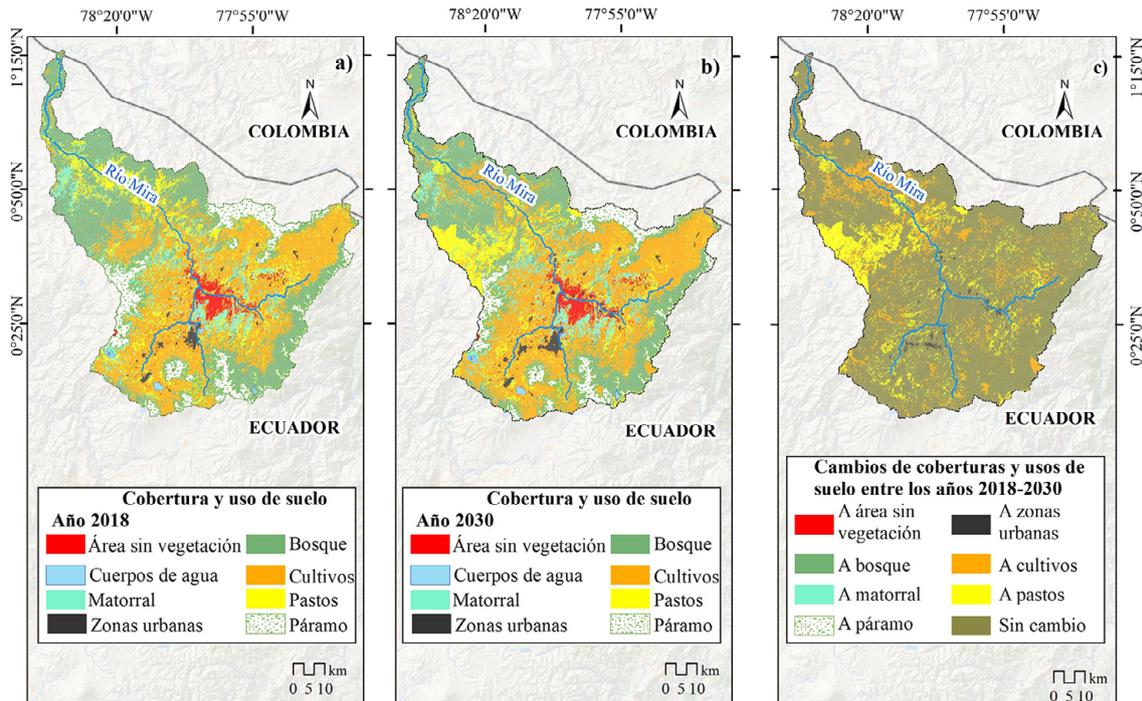
Figura 8. Cambios en las coberturas de suelo del 2018 al 2030



Elaboración propia

Además, la proyección evidenció que habrá una reducción del 20,52% para los páramos, siendo esta reducción mayor al 2,26% observado en 1996-2018. De forma contraria, se observa que la disminución de los bosques solo será del 6,84% para la proyección 2018-2030, frente al 20,04% que se observó en 1996-2018. Hasta el 2030 se esperaría que, aparte de la expansión de zonas urbanas, se expanda los pastos hacia el sector oriental de la cuenca hidrográfica y que los cultivos se sigan incrementando más al norte del territorio. Al igual que en la transición del 2018, la persistencia de coberturas se mantendría principalmente al sur-oeste, oeste y este (Figura a-c). Sin embargo, a diferencia de lo que sucede en el pasado, no aumentarían las áreas sin vegetación en el centro de la unidad hidrográfica (Figura 9c).

Figura 9. LULC y sus cambios proyectados del 2018 al 2030. a) LULC del año 2018, b) LULC proyectado al año 2030, c) transición de los cambios de cobertura de suelo proyectados entre 2018 y 2030



Elaboración propia

3.4. Identificación de los agentes y factores propulsores

Los cambios de LULC en el área de estudio van a depender de la continuidad de las actividades tradicionales y la expansión hacia otras nuevas actividades, principalmente generadas por un aumento de la demanda del mercado y un desarrollo económico. Estos factores sumados al aumento de la población han propiciado un impulso en la economía. En consecuencia, con el fin de comprender la evolución del LULC y sobre la base de las actividades humanas específicas que ocasionan las diferentes transformaciones de coberturas, se identificaron los factores propulsores, los tipos de agentes que los causan y la escala a la que representan (Tabla 4).

Tabla 4. Tipos de escalas, factores propulsores y actores de los cambios de LULC en la cuenca hidrográfica del río Mira

Factores propulsores	Agentes	Tipos de Escalas
Expansión agrícola y ganadera	Agentes agrícolas y ganaderos: Habitantes de las comunidades rurales dueños de tierra, se dedican a la agricultura y ganadería con fines de autoconsumo y/o comercio local. Se sienten atraídos por a nuevos suelos fértiles con condiciones climáticas adecuadas, influyendo en la reducción de la cobertura natural. Compuestos por pequeñas asociaciones de productores de caña de azúcar, mangos uvilla y leche.	Pequeña escala
Crecimiento Urbano	Agentes inmobiliarios: Pequeños empresarios que pueden incluir a antiguos funcionarios, hombres de negocios, profesionales de la construcción, políticos, funcionarios y exfuncionarios estatales. Establecen nuevas urbanizaciones asegurando que exista un sistema de carreteras.	Mediana escala
Crecimiento de la industria forestal	Agentes Forestales: Pequeñas asociaciones y aserraderos locales, estos no disponen de rodales anuales permanentes de producción. Aprovechan madera de bosques de eucalipto, pino, aliso y ciprés.	
Expansión de actividades mineras a pequeña y gran escala	Agentes mineros: Actores emergentes compuestos por asociaciones de pequeños mineros artesanales y empresas mineras transnacionales, este último solo realiza actividades de exploración. Actúan en función a la demanda nacional.	
Gubernamental	Agentes gubernamentales: Representantes de los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs).	

Elaboración propia

3.5. Análisis de las causas subyacentes

Se identificaron para el presente y futuro las siguientes causas subyacentes: factores demográficos, económicos, tecnológicos, culturales e institucionales.

3.5.1. Factores demográficos

Se ha observado un creciente aumento en la población de la cuenca media-alta del río Mira, especialmente en el centro poblado de Ibarra (Teran, 2018). Las entrevistas sugieren que el aumento de las áreas urbanas se debe a las oportunidades que genera la educación. En la región andina, la permanencia de los miembros de la familia rural en sus comunidades es común, excepto los hijos/as que estudian, alcanzan profesiones y generalmente no regresan a sus comunidades. Este aumento poblacional y esta migración ocasionan una mayor demanda de recursos y cambios en los patrones de consumo. Es decir, no solo existe un mayor requerimiento de productos agrícolas, sino también productos forestales, inmobiliarios, incluso mineros. Esto es percibido por todos los agentes. Por lo tanto, esperan que para el futuro el crecimiento poblacional favorezca al crecimiento de sus actividades, con excepción al sector agrícola, ya que es consciente de la migración ciudad-campo.

3.5.2. Factores económicos

El principal factor económico que afecta a los agentes de pequeña y mediana escala es la demanda del mercado, mientras que la pobreza es un factor que generalmente impactó en los agentes de pequeña escala. Se ha visto que la pobreza tiene un efecto significativo en los sectores ganadero y forestal, dado que su cadena productiva depende de agentes de pequeña escala, es por ello que los agentes no esperan que el impacto de la pobreza disminuya, aunque las metas futuras gubernamentales e internacionales así lo planifiquen. Por otra parte, se ha observado que los bajos precios, las especulaciones y el contrabando ilegal en el sector agrícola han afectado los ingresos de los agentes. De la misma forma, el no cumplimiento del precio fijado estatalmente de la leche por los agroindustriales e intermediarios de la zona han afectado los ingresos de los productores. A pesar de estos problemas, la demanda del mercado es y seguirá siendo el principal impulsor de las actividades económicas y en consecuencia de las transformaciones de cobertura de suelo, esto también fue percibido por todos los agentes.

3.5.3. Factores tecnológicos

Los principales factores tecnológicos que inciden en el desarrollo de los actores son la baja productividad y desarrollo de infraestructura. Sin embargo, en el área de estudio la baja productividad no parece tener un rol preponderante en la expansión de las actividades de los diferentes actores. Principalmente, los sectores agrícolas y ganaderos conciben al crecimiento y expansión de sus actividades suficientes para satisfacer la demanda actual y futura de sus productos. Por otro lado, el desarrollo tecnológico dentro de la región hace referencia al desarrollo vial como las carreteras y vías de comunicación; sin embargo, al mismo tiempo, el impulso de la deforestación y la minería ilegal. Bajo ese contexto, los agentes forestales y mineros señalan que el desarrollo vial tiene un impacto positivo en sus actividades, además el sector inmobiliario señala al desarrollo vial como una gran oportunidad. Al contrario, los sectores ganaderos y agrícolas consideran que el impacto vial en sus actividades es mínimo. Para el futuro, se espera que el aumento de vías de comunicación se mantenga y permita el crecimiento de la industria junto a la expansión de las actividades.

3.5.4. Factores culturales

En los factores culturales se identificaron a los patrones de consumo y el minifundio. Uno de los problemas que más afectan a la población campesina-indígena asentada en los Andes ecuatorianos es la generación de minifundios producto del fraccionamiento de la tierra generada por la herencia de propiedades. Un minifundio se caracteriza por ser un terreno destinado a la producción agropecuaria con las dimensiones reducidas, limitando los ingresos económicos del campesino y lo obliga a practicar una agricultura de subsistencia. En el área de estudio, la generación de los minifundios es el resultado de procesos internos como la presión demográfica y de procesos externos que se relacionan con los nuevos precios de la tierra en el mercado. Los agentes agrícolas y ganaderos perciben al minifundio como un factor que afecta las posibilidades de mejorar la vida de las familias y ante esto, buscan oportunidades en nuevas tierras productivas para su expansión agrícola y ganadera. Por otro lado, el cambio de patrones de consumo se encuentra ligado al aumento de la población, lo cual genera el desarrollo y el crecimiento de actividades agrícolas, ganaderas y forestales e incluso promueve el crecimiento del sector inmobiliario.

3.5.5. Factores institucionales

En el área de estudio no existe una política pública que impulse la conservación forestal, ni mucho menos que regule el crecimiento urbano. Tampoco existen planes del gobierno para el uso sostenible de las coberturas de suelo, propiciando a una disminución de las coberturas naturales. Esta tendencia se mantendrá en el futuro, a menos que se diseñe una política pública que cambie la percepción de los actores y con ello regule sus actividades. La falta de regulación es percibida por todos los actores como una causa futura que mantendrá la tendencia de la expansión de todas sus actividades.

4. Discusión de resultados

Los resultados muestran un aumento de las áreas antrópicas y una reducción de las coberturas naturales, tanto en el periodo de 1996-2018 y lo proyectado para el 2030. Los resultados proyectados a futuro mediante el modelo combinado CA-Markov, confirman que los cambios temporales en la cobertura y uso del suelo son controlados por cadenas de Markov (Guan et al., 2011), mientras que los cambios espaciales vienen determinados por un filtro espacial del modelo CA (Fu et al., 2022). En la presente simulación se comprobó el efecto de los autómatas celulares en la modelación. Por ejemplo, se observa la aplicación de reglas iterativas propias de los modelos CA en la expansión de las áreas urbanas simuladas, porque celdas que en T1 y T2 estaban rodeadas por al menos tres celdas de uso urbano, entonces en T3 estas celdas se convirtieron en usos urbanos. Aunque el potencial del modelo CA-Markov ha sido reconocido por otros estudios realizados a nivel mundial (Aburas et al., 2017; Gidey et al., 2017; Guan et al., 2011), la simulación no está exenta a limitaciones (Gharaibeh et al., 2020).

El módulo LCM del software TerrSet presenta tres limitaciones o condicionantes importantes (Gibson et al., 2018). La primera se relaciona con las cadenas de Markov porque estas simulan tasas de cambio constantes, lo cual impide ingresar al modelo fuerzas externas dinámicas que normalmente ejercen presión constante, como es el caso del cambio climático. La segunda limitación se produce porque la selección de variables explicativas es subjetiva por el investigador. Pese a que se utiliza la prueba estadística V de Cramer para comprobar su rol, los valores estadísticos que se obtienen no representan el peso ponderado en el modelo. Además, las variables explicativas espaciales se implementan en el modelo como estables en el tiempo, por lo que tendrán la misma influencia en T2 hasta T3. Esto último, junto a la necesidad de contar con información espacial de cada variable considerada explicativa, se convierte en la tercera limitante (Beroho et al., 2023; Eastman, 2006; Eastman & Toledano, 2018).

Frente a lo expuesto, el principal condicionante en el presente estudio radicó en la dificultad de incorporar variables socioeconómicas y culturales como factores propulsores, debido a la falta de información completa de su distribución temporal y espacial. Aquí se encuentran casos como: valores culturales, ingresos per cápita o familiares, normativas, políticas o percepciones sociales. Para obtener una mejor comprensión de los resultados obtenidos desde el modelo CA-Markov se integró un enfoque cualitativo en la presente investigación para identificar los factores propulsores y subyacentes que propician el cambio del LULC, pero desde la perspectiva y percepciones de los diferentes actores. Aunque las potencialidades del modelo CA-Markov ha sido comprobado por varios estudios a nivel global (Girma et al., 2022; Halmy et al., 2015; Mansour et al., 2020; Ramos-Reyes et al., 2021), también ha sido advertida la necesidad de tomar en cuenta los factores impulsores en la simulación en términos sociales, económicos, culturales aparte de los ambientales (Aburas et al., 2017).

Los modelos CA-Markov simulan los cambios y transiciones de LULC en forma lineal, lo cual los convierte en modelos restrictivos (Wang et al., 2022). En el presente estudio, la aplicación de un modelo combinado CA-Markov a las imágenes satelitales proporcionó una mayor comprensión de los cambios en el LULC, lo cual confirma lo señalado por (Beshir et al., 2023; Ozturk, 2015) quienes señalaron que el uso de imágenes satelitales mejoran la exactitud de las simulaciones futuras al proporcionar datos más consistentes del pasado y del presente. Al igual que en otros estudios, el modelo integrado CA-Markov funcionó y simuló de forma adecuada, al presentar un valor FoM de 55%, en donde un resultado superior al 50% comprueba que más de la mitad de las predicciones realizadas por el modelo son correctas en comparación con los datos reales. Obtener un traslapo perfecto del 100% es casi imposible, y de hecho, obtener valores bajos es común (Paegelow et al., 2022).

El valor FoM calculado fue similar al obtenido por Mathewos et al. (2022) (FoM=50,5%) en la simulación futura de la cobertura y uso de suelo en la cuenca hidrográfica de Matenchosen y al determinado por Moradi et al.

(2020) en la llanura Izeh-Pyon en Irán (FoM=47,79%). Estos valores demostrarían que el traslape encontrado en el estudio es aceptado a nivel global. Además, el alto valor de persistencia encontrado producto del análisis de transición de cobertura demuestra que las áreas de cobertura no han cambiado significativamente, lo cual facilita el traslape en la simulación. En general, cuando los valores de persistencia son altos, se muestran valores altos en la validación (Pontius et al., 2004). Un ejemplo de ello lo proporcionan (Tolessa et al., 2017), quienes en su estudio sobre el cambio de LULC en las montañas centrales de Etiopía, entre 1973 y 2015, registraron un coeficiente Kappa de 0,84 en su validación. Este alto coeficiente estuvo asociado a un valor de persistencia que superaba el 50%.

Las coberturas naturales que han mantenido su disminución constante fueron los bosques y los pastos. Esta tendencia es común dentro de los países en desarrollo que se encuentran en el hemisferio sur, observando una tendencia a la disminución de coberturas naturales debido al aumento de las áreas agrícolas (Winkler et al., 2021). En Sudamérica es un patrón común el avance de la deforestación producto del incremento de espacios agrícolas y urbanos (Andrade-Núñez & Aide, 2018; Richards et al., 2012; Sy et al., 2015). Ecuador hasta el 2008 presentaba la tasa de deforestación más alta en Sudamérica (Mosandl et al., 2008). Por lo que, en el país es común observar cómo se pierden bosques amazónicos (Heredia-R et al., 2021), y como se reemplazan coberturas naturales en la cuenca del río Chambo en el centro-sur del país (Ross et al., 2017) y en la cuenca del río Guayllabamba (Abad-Auquilla, 2020).

El desplazamiento de los bosques y pastos parece ser un proceso recurrente en todo Ecuador, probablemente por los mismos factores observados en la cuenca del río Mira. Destacando entre todos el crecimiento poblacional y el aumento de la demanda de alimentos, como las principales fuerzas que impulsan este cambio de cobertura (van Dijk et al., 2021). Se observó en el periodo 1996-2018, una reducción de casi el 70% de los matorrales, sin embargo, no se apreció cambios durante la proyección del 2018-2030. Probablemente, el reemplazo de la vegetación original del matorral por otra categoría de cobertura terrestre se ha visto limitada por la accesibilidad dentro del área de estudio, a pesar de que estas coberturas presentan tendencias de cambio en la mayoría de los ecosistemas semiáridos a nivel mundial (Rosete Vergés et al., 2014). De forma contraria, la disminución de los páramos solo fue considerable en la proyección del 2018-2030, posiblemente gracias al aumento de las zonas urbanas y vías de comunicación que permitieron su uso. Esto se ha visto anteriormente en los alrededores de Quito, evidenciando una reducción de los páramos para el desarrollo de la agricultura (Thompson et al., 2021).

Al integrar análisis cualitativos a la utilización de herramientas geoespaciales es posible comprender las causas subyacentes y los impulsores de cambio del LULC. Esto permitió evaluar las interacciones complejas de fuerzas sociales, políticas, económicas, tecnológicas y culturales que presentan las causas subyacentes (Zhai et al., 2020). En la cuenca hidrográfica media-alta del río Mira, se ha determinado que, de acuerdo a los actores, los principales factores que ocasionan el cambio de usos y coberturas de suelo en la cuenca fueron sociales y económicos. El aumento de la población dentro de la cuenca hidrográfica es un factor demográfico que genera un aumento de la demanda en el mercado y por consiguiente se intensifica el uso de los recursos del suelo. Este tipo de tendencias se ha visto de forma acelerada en regiones del occidente de África, de forma moderada en países de Asia y Latinoamérica (García & Ballester, 2016; Herrmann et al., 2020; Mhawish & Saba, 2016).

Por otro lado, con una buena política de los recursos naturales se puede revertir la pérdida de las coberturas vegetales, como es el caso de India y China (Chen et al., 2019). Adicionalmente, este aumento poblacional se correlaciona con una expansión de las áreas urbanas y agrícolas en los países en vías de desarrollo (Winkler et al., 2021). De acuerdo a la percepción de los habitantes de la cuenca hidrográfica del río Mira, el crecimiento familiar genera una necesidad de expansión de coberturas naturales por agrícolas, debido al crecimiento de sus necesidades y la reducción de sus ingresos económicos. Estos factores son muy comunes en las zonas rurales, donde las familias dependen de la agricultura y ganadería como su única fuente de ingresos (Barrientos-Fuentes & Torrico-Albino, 2014). Esta tendencia también se ha observado como uno de los factores económicos que propician la transformación del suelo en los bosques amazónicos peruanos (Coomes et al., 2011). Por otro lado, dentro del sector urbano, la falta de recursos económicos disminuye la capacidad adquisitiva y obliga a ocupar nuevas zonas periféricas de menor valor.

Los agentes de mediana escala de la cuenca del río Mira, también han manifestado que sus actividades aumentarán frente al incremento de la población, en especial la ganadería y la agricultura, por el aumento de la demanda de alimentos que esto conlleva. Este último promoverá la expansión de la frontera agrícola, siendo este uno de los principales factores de las pérdidas de bosques ante el sobreuso antrópico del suelo

influenciado por el excesivo requerimiento de productos (Winkler et al., 2021). Por ejemplo, en la región del Gran Chaco, ubicado en los países de Argentina, Bolivia y Paraguay, la demanda de la soya ha ocasionado la expansión del cultivo, impulsando una deforestación en la región (Fehlenberg et al., 2017). Algo similar sucede en Perú, donde por las necesidades del mercado internacional del aceite de palma, extensas regiones de bosque en la Amazonía peruana han sido reemplazadas por plantaciones de palma entre los años 2000-2014 (Bennett et al., 2018).

Se ha observado que dentro de la cuenca media-alta del río Mira, la escasa regulación ambiental promueve la expansión de las actividades de los agentes de pequeña y mediana escala, promoviendo los cambios del LULC. Ante este escenario, la respuesta más adecuada sería la planificación correcta del uso de suelo relacionada directamente con la capacidad principal de este, sin olvidar las necesidades de los habitantes. La gestión de uso sustentable del suelo debe delinarse mediante políticas de planificación urbana y rural. De hecho, la regulación del desarrollo urbano debe estar dirigida a asumir, ordenar, fomentar, contener y detener el crecimiento mediante medidas que frenen el progreso de actividades residenciales e industriales (Farrugia et al., 2019). En Latinoamérica se considera al ordenamiento territorial como opción de política urbana para regular su crecimiento y expansión (Carrión et al., 2020).

Sin embargo, los planes de ordenamiento no han conseguido regular el crecimiento urbano y se han convertido en documentos que no generan resultados tangibles porque no se han convertido en una verdadera política de Estado, ya que normalmente solo cumplen un requerimiento legal o institucional de la administración de turno (Cabeza, 2002; Gudiño, 2016). Por su parte, las políticas de desarrollo rural en América Latina no han alcanzado a mejorar las condiciones de la población rural ni evitar la migración hacia las ciudades, porque se han encaminado al ajuste estructural o hacia las políticas de estabilización económica (Sales, 2020).

En consecuencia, políticas de desarrollo que generen prácticas agrarias eficaces podría reducir las brechas sociales en el campo y evitar condiciones socioeconómicas que impulsen el cambio de coberturas y usos de suelo. Los programas para el fortalecimiento de las organizaciones agrícolas y la optimización tecnológica pueden mejorar la gobernanza del mercado agrario, reducir los costos de producción y mejorar la rentabilidad de producción (Peng et al., 2022). Además, en el sector rural se deben mantener vigentes buenas prácticas agrícolas como los sistemas agroecológicos tradicionales, para propiciar un aumento de la diversidad genética, modernización de sistemas de riego y restauración ecológica de ecosistemas degradados (Altieri et al., 2017).

5. Conclusiones

Esta investigación propuso un enfoque integrador que incluye un modelo de CA-Markov para explorar el cambio en las coberturas y usos del suelo en una cuenca hidrográfica, y un posterior análisis de las causas propulsoras y subyacentes que originarían este cambio. Esto último tomando como referencia la perspectiva de los diferentes actores. Se ha demostrado que en los modelos CA-Markov los cambios temporales en la cobertura y uso del suelo son controlados por cadenas de Markov y que los cambios espaciales están condicionados por las reglas iterativas que generan los autómatas celulares. Por ello, los modelos CA-Markov llegan a representar adecuadamente la transición de coberturas y simulan razonablemente el futuro de espacios territoriales dinámicos con expectativas de crecimiento urbano, agrícola, forestal e incluso industrial. Si bien las capacidades de modelización aumentan con el uso de estos modelos y parámetros de validación, es fundamental que los métodos de validación se amplíen al mismo tiempo y consideren métodos cualitativos para su comprensión. El empleo de estadísticas como la precisión del usuario, la precisión del productor para validar la clasificación del LULC y la utilización de estadísticas como la FoM, el desacuerdo de cantidad y el desacuerdo de asignación permiten tener una lectura más ajustada a la realidad de las clasificaciones realizadas mediante teledetección, y así evitar errores en la simulación.

En definitiva, los resultados encontrados en el presente estudio invitan a una reflexión sobre la toma de decisiones, porque la planificación del uso de suelo también debe considerar activamente la percepción de los actores. Esto debido a que sus motivos para desarrollar actividades económicas son los factores propulsores y causas subyacentes de los cambios espaciales de LULC observados y los esperados en el futuro. Se observa en lo encontrado en la cuenca media-alta del río Mira, en donde se evidencia una disminución de las coberturas naturales, especialmente de los bosques y pastos, frente a un aumento de las coberturas antrópicas, como las áreas de cultivo y zonas urbanas. Esta tendencia, de acuerdo a las entrevistas, estuvo influenciada por la expansión agrícola y ganadera, el crecimiento urbano, la expansión de las actividades mineras y el desarrollo de la industria forestal; los cuales fueron impulsados por un incremento poblacional,

aumento de la demanda de mercado, cambios en los patrones de consumo de la población, expansión de las vías de comunicación y una falta de políticas públicas que regulen el cambio del uso de suelo. Por lo tanto, se espera que hasta el año 2030, estos mismos factores influyan en el cambio de uso de suelo, con excepción del sector agrícola, que es consciente del impacto de la migración campo-ciudad en la expansión de sus actividades.

Estos resultados confirman que los análisis de cambio de coberturas y usos de suelo junto a simulaciones futuras brindan información que puede ser útil para la toma de decisiones y la planificación territorial. Más aún, si al dar lectura de las estadísticas se considera las motivaciones de los actores que conviven dentro del territorio. Por lo cual, es importante incorporar estos datos en los planes de desarrollo territorial, monitorear continuamente el LULC mediante el desarrollo de nuevas investigaciones, desarrollar políticas de conservación por parte de los tomadores de decisiones y, sin duda, sensibilizar y educar a la población.

Referencias

- Abad-Auquilla, A. (2020). El cambio de uso de suelo y la utilidad del paisaje periurbano de la cuenca del río Guayllabamba en Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2), 68-91. <https://doi.org/10.15359/rca.54-2.4>
- Abdelkareem, O. E. A., Elamin, H. M. A., Eltahir, M. E. S., Adam, H. E., Elhaja, M. E., Rahamtalla, A. M., Babatunde, O., & Elmar, C. (2018). Accuracy assessment of land use land cover in Umabdalla natural reserved forest, South Kordofan, Sudan. *International journal of agricultural and environmental sciences*, 3(1), 5-9.
- Aburas, M. M., Ho, Y. M., Ramli, M. F., & Ash'aari, Z. H. (2017). Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 59, 65-78. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.03.006>
- Alqadhi, S., Mallick, J., Balha, A., Bindajam, A., Singh, C. K., & Hoa, P. V. (2021). Spatial and decadal prediction of land use/land cover using multi-layer perceptron-neural network (MLP-NN) algorithm for a semi-arid region of Asir, Saudi Arabia. *Earth Science Informatics*, 14(3), 1547-1562. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00633-2>
- Altieri, M., Nicholls, C., & Montalba, R. (2017). Technological Approaches to Sustainable Agriculture at a Crossroads: An Agroecological Perspective. *Sustainability*, 9(3), 349. <https://doi.org/10.3390/su9030349>
- Andrade-Núñez, M. J., & Aide, T. M. (2018). Built-up expansion between 2001 and 2011 in South America continues well beyond the cities. *Environmental Research Letters*, 13(8), 084006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad2e3>
- Arias-Muñoz, P., Saz, M. Á., & Escolano, S. (2023). Effects of land use change on soil erosion in the upper-middle basin of Mira river in Andean-Ecuador. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, 67(1), 115-140.
- Astola, H., Häme, T., Sirro, L., Molinier, M., & Kilpi, J. (2019). Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region. *Remote Sensing of Environment*, 223, 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.019>
- Barrientos-Fuentes, J. C., & Torrico-Albino, J. C. (2014). Socio-economic perspectives of family farming in South America: Cases of Bolivia, Colombia and Peru. *Agronomía Colombiana*, 32(2), 266-275. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n2.42310>
- Bennett, A., Ravikumar, A., & Cronkleton, P. (2018). The effects of rural development policy on land rights distribution and land use scenarios: The case of oil palm in the Peruvian Amazon. *Land Use Policy*, 70, 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.011>
- Beroho, M., Briak, H., Cherif, E. K., Boulahfa, I., Ouallali, A., Mrabet, R., Kebede, F., Bernardino, A., & Aboumaria, K. (2023). Future Scenarios of Land Use/Land Cover (LULC) Based on a CA-Markov Simulation Model: Case of a Mediterranean Watershed in Morocco. *Remote Sensing*, 15(4), 1162. <https://doi.org/10.3390/rs15041162>
- Beshir, S., Moges, A., & Dananto, M. (2023). Trend analysis, past dynamics and future prediction of land use and land cover change in upper Wabe-Shebele river basin. *Heliyon*, 9(9), e19128. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19128>
- Betru, T., Tolera, M., Sahle, K., & Kassa, H. (2019). Trends and drivers of land use/land cover change in Western Ethiopia. *Applied Geography*, 104, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.02.007>
- Cabeza, Á. M. (2002). Ordenación del territorio en América Latina. *Scripta Nova: Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 6(125), 1-35.
- Carodenuto, S., Merger, E., Essomba, E., Panev, M., Pistorius, T., & Amougou, J. (2015). A Methodological Framework for Assessing Agents, Proximate Drivers and Underlying Causes of Deforestation: Field Test Results from Southern Cameroon. *Forests*, 6(12), 203-224. <https://doi.org/10.3390/f6010203>

- Carrión, A., Vieyra, A., Arenas, F., & Alvarado, V. (2020). Políticas y prácticas de ordenamiento territorial en América Latina. *Revista de Geografía Norte Grande*, 77, 5-10. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022020000300005>
- Chang, Y., Hou, K., Li, X., Zhang, Y., & Chen, P. (2018). Review of Land Use and Land Cover Change research progress. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 113, 012087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012087>
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., Fuchs, R., Brovkin, V., Ciais, P., Fensholt, R., Tømmervik, H., Bala, G., Zhu, Z., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2(2), 122-129. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2023). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: En la mitad del camino hacia 2030. Objetivos, metas e indicadores*. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/81eff451-0f82-4332-ae5-9f25f2950b45/content>
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9780429052729>
- Coomes, O. T., Takasaki, Y., & Rhemtulla, J. M. (2011). Land-use poverty traps identified in shifting cultivation systems shape long-term tropical forest cover. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(34), 13925-13930. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012973108>
- Eastman, J. R. (2006). *IDRISI Andes guide to GIS and image processing*. Clark University, Worcester, 328.
- Eastman, J., & Toledano, J. (2018). A short presentation of the Land Change Modeler (LCM). En *Geomatic approaches for modeling land change scenarios* (pp. 499-505). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60801-3_36
- Farrugia, D., Hanley, J., Sherval, M., Askland, H., Askew, M., Coffey, J., & Threadgold, S. (2019). The local politics of rural land use: Place, extraction industries and narratives of contemporary rurality. *Journal of Sociology*, 55(2), 306-322. <https://doi.org/10.1177/1440783318773518>
- Fehlenberg, V., Baumann, M., Gasparri, N. I., Piquer-Rodríguez, M., Gavier-Pizarro, G., & Kuemmerle, T. (2017). The role of soybean production as an underlying driver of deforestation in the South American Chaco. *Global Environmental Change*, 45, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.05.001>
- Fu, F., Deng, S., Wu, D., Liu, W., & Bai, Z. (2022). Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103760. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103760>
- Gallardo, M. (2018). Revisión y análisis de estudios de modelos de cambios de usos del suelo y de escenarios a futuro. *Geographicalia*, 70, 1-26. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2018703278
- García, A. S., & Ballester, M. V. R. (2016). Land cover and land use changes in a Brazilian Cerrado landscape: Drivers, processes, and patterns. *Journal of Land Use Science*, 11(5), 538-559. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2016.1182221>
- García Valdés, M., & Suárez Marín, M. (2013). El método Delphi para la consulta a expertos en la investigación científica. *Revista Cubana de Salud Pública*, 39(2), 253-267.
- Geist, H., McConnell, W., Lambin, E. F., Moran, E., Alves, D., & Rudel, T. (2006). Causes and trajectories of land-use/cover change. En *Land-use and land-cover change: Local processes and global impacts* (pp. 41-70). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-32202-7_3
- Gharaibeh, A., Shaamala, A., Obeidat, R., & Al-Kofahi, S. (2020). Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model. *Heliyon*, 6(9), e05092. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05092>
- Gibson, L., Münch, Z., Palmer, A., & Mantel, S. (2018). Future land cover change scenarios in South African grasslands—implications of altered biophysical drivers on land management. *Heliyon*, 4(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00693>
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebege, R., Segosebe, E., & Zenebe, A. (2017). Cellular automata and Markov Chain (CA_Markov) model-based predictions of future land use and land cover scenarios (2015–2033) in Raya,

- northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3, 1245-1262. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0397-6>
- Girma, R., Fürst, C., & Moges, A. (2022). Land use land cover change modeling by integrating artificial neural network with cellular Automata-Markov chain model in Gidabo river basin, main Ethiopian rift. *Environmental Challenges*, 6, 100419. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100419>
- Guan, D., Li, H., Inohae, T., Su, W., Nagaie, T., & Hokao, K. (2011). Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model. *Ecological Modelling*, 222(20-22), 3761-3772. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.09.009>
- Gudiño, M. E. (2016). El Ordenamiento Territorial como política de Estado. *Perspectiva Geográfica*, 20(1), 11-36. <https://doi.org/10.19053/01233769.4491>
- Halmy, M. W. A., Gessler, P. E., Hicke, J. A., & Salem, B. B. (2015). Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA. *Applied Geography*, 63, 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.015>
- Henríquez Ruiz, C., & García Azócar, G. (2007). Propuesta de modelos predictivos en la planificación territorial y evaluación de impacto ambiental. *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 11(245), 1-17.
- Heredia-R, M., Torres, B., Cabrera-Torres, F., Torres, E., Díaz-Ambrona, C. G., & Pappalardo, S. E. (2021). Land Use and Land Cover Changes in the Diversity and Life Zone for Uncontacted Indigenous People: Deforestation Hotspots in the Yasuní Biosphere Reserve, Ecuadorian Amazon. *Forests*, 12(11), 1539. <https://doi.org/10.3390/f12111539>
- Herrera-Franco, G., Escandón-Panchana, P., Montalván, F. J., & Velastegui-Montoya, A. (2022). CLUE-S model based on GIS applied to management strategies of territory with oil wells—Case study: Santa Elena, Ecuador. *Geography and Sustainability*, 3(4), 366-378. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2022.11.001>
- Herrmann, S. M., Brandt, M., Rasmussen, K., & Fensholt, R. (2020). Accelerating land cover change in West Africa over four decades as population pressure increased. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 53. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00053-y>
- Hua, A. K. (2017). Application of CA-Markov model and land use/land cover changes in Malacca river watershed, Malaysia. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(4), 605-622. https://doi.org/10.15666/aeer/1504_605622
- Iacono, M., Levinson, D., El-Geneidy, A., & Wasfi, R. (2015). A Markov chain model of land use change. *TeMA Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 8(3), 263-276.
- Leta, M. K., Demissie, T. A., & Tränckner, J. (2021). Modeling and Prediction of Land Use Land Cover Change Dynamics Based on Land Change Modeler (LCM) in Nashe Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sustainability*, 13(7), 3740. <https://doi.org/10.3390/su13073740>
- Linstone, H. A., Turoff, M., & others. (1975). *The delphi method*. Addison-Wesley Reading, MA.
- Lippe, M., Thai Minh, T., Neef, A., Hilger, T., Hoffmann, V., Lam, N. T., & Cadisch, G. (2011). Building on qualitative datasets and participatory processes to simulate land use change in a mountain watershed of Northwest Vietnam. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1454-1466. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.009>
- Lyche Solheim, A., Tolvanen, A., Skarbøvik, E., Kløve, B., Collentine, D., Kronvang, B., Blicher-Mathiesen, G., Hashemi, F., Juutinen, A., Hellsten, S., Pouta, E., & Vermaat, J. E. (2023). Land-use change in a Nordic future towards bioeconomy: A methodological framework to compare and merge stakeholder and expert opinions on qualitative scenarios. *CATENA*, 228, 107100. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107100>
- Mansour, S., Al-Belushi, M., & Al-Awadhi, T. (2020). Monitoring land use and land cover changes in the mountainous cities of Oman using GIS and CA-Markov modelling techniques. *Land Use Policy*, 91, 104414. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104414>
- Mathewos, M., Lencha, S. M., & Tsegaye, M. (2022). *Land Use and Land Cover Change Assessment and Future Predictions in the Matenchose Watershed, Rift Valley Basin, Using CA-Markov Simulation*. <https://doi.org/10.3390/land11101632>

- Mhawish, Y. M., & Saba, M. (2016). Impact of population growth on land use changes in Wadi Ziqlab of Jordan between 1952 and 2008. *International Journal of Applied Sociology*, 6(1), 7-14.
- Moradi, F., Kaboli, H. S., & Lashkarara, B. (2020). Projection of future land use/cover change in the Izeh-Pyon Plain of Iran using CA-Markov model. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(19), 998. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05984-6>
- Mosandl, R., Günter, S., Stimm, B., & Weber, M. (2008). Ecuador suffers the highest deforestation rate in South America. *Gradients in a tropical mountain ecosystem of Ecuador*, 37-40. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73526-7_4
- OpenStreetMap. (2021). *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/#map=9/0.6193/-78.4753>
- Ortega Chuquín, J. U., & Arias Muñoz, D. P. (2022). Análisis de los efectos del cambio de uso de suelo en el paisaje del bosque húmedo: Una visión al año 2022 en la cuenca del río Cayapas-Ecuador. *SATHIRI*, 17(1), 288-311. <https://doi.org/10.32645/13906925.1116>
- Ozturk, D. (2015). Urban growth simulation of Atakum (Samsun, Turkey) using cellular automata-Markov chain and multi-layer perceptron-Markov chain models. *Remote Sensing*, 7(5), 5918-5950. <https://doi.org/10.3390/rs70505918>
- Paegelow, M., Mas, J.-F., Gallardo, M., Camacho, M. T., & García-Álvarez, D. (2022). Pontius Jr. Methods Based on a Cross-Tabulation Matrix to Validate Land Use Cover Maps. En *Land Use Cover Datasets and Validation Tools*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7>
- Peng, J., Zhao, Z., & Liu, D. (2022). Impact of Agricultural Mechanization on Agricultural Production, Income, and Mechanism: Evidence From Hubei Province, China. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 838686. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.838686>
- Pontius, R. G., Boersma, W., Castella, J.-C., Clarke, K., de Nijs, T., Dietzel, C., Duan, Z., Fotsing, E., Goldstein, N., Kok, K., Koomen, E., Lippitt, C. D., McConnell, W., Mohd Sood, A., Pijanowski, B., Pithadia, S., Sweeney, S., Ngoc Trung, T., Veldkamp, A. T. & Verburg, P. H. (2008). Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *The Annals of Regional Science*, 42, 11-37. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0138-2>
- Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407-4429. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Ramos-Reyes, R., Palomeque-De La Cruz, M. Á., Megia-Vera, H. J., & Pascual-Landeros, D. (2021). Modelo del cambio de uso de suelo en el sistema lagunar Carmen-Pajonal-Machona, México. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.587>
- Richards, P. D., Myers, R. J., Swinton, S. M., & Walker, R. T. (2012). Exchange rates, soybean supply response, and deforestation in South America. *Global Environmental Change*, 22(2), 454-462. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.01.004>
- Rodrigues Da Cunha, E., Guimarães Santos, C. A., Marques Da Silva, R., Bacani, V. M., & Pott, A. (2021). Future scenarios based on a CA-Markov land use and land cover simulation model for a tropical humid basin in the Cerrado/Atlantic forest ecotone of Brazil. *Land Use Policy*, 101, 105141. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105141>
- Rodríguez-Echeverry, J., & Leiton, M. (2021). Pérdida y fragmentación de ecosistemas boscosos nativos y su influencia en la diversidad de hábitats en el hotspot Andes tropicales. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 92(0), 923449. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2021.92.3449>
- Rosete Vergés, F. A., Velázquez, A., Bocco, G., & Espejel, I. (2014). Multi-scale land cover dynamics of semiarid scrubland in Baja California, Mexico. *Regional Environmental Change*, 14(4), 1315-1328. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0574-8>

- Ross, C., Fildes, S., & Millington, A. (2017). Land-Use and Land-Cover Change in the Páramo of South-Central Ecuador, 1979–2014. *Land*, 6(3), 46. <https://doi.org/10.3390/land6030046>
- Salazar, E., Henríquez, C., Sliuzas, R., & Qüense, J. (2020). Evaluating Spatial Scenarios for Sustainable Development in Quito, Ecuador. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3), 141. <https://doi.org/10.3390/ijgi9030141>
- Sales, R. G. (2020). Propuesta metodológica para definir unidades locales de gestión para el ordenamiento territorial rural. *Revista INVI*, 35(98), 126-154. <https://doi.org/10.4067/S0718-83582020000100126>
- Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). (2021). *USGS science for changing world. Earth Explorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Shao, G., & Wu, J. (2008). On the accuracy of landscape pattern analysis using remote sensing data. *Landscape Ecology*, 23(5), 505-511. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9215-x>
- Shukla, A. K., Ojha, C. S. P., Mijic, A., Buytaert, W., Pathak, S., Garg, R. D., & Shukla, S. (2018). Population growth, land use and land cover transformations, and water quality nexus in the Upper Ganga River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4745-4770. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4745-2018>
- Sistema Nacional de Información. (2022). *Sistema Nacional de Información*. <https://sni.gob.ec/coberturas>
- Stevens, D., & Dragičević, S. (2007). A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(4), 708-724. <https://doi.org/10.1068/b32098>
- Sy, V. D., Herold, M., Achard, F., Beuchle, R., Clevers, J. G. P. W., Lindquist, E., & Verchot, L. (2015). Land use patterns and related carbon losses following deforestation in South America. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124004>
- Teran, G. J. (2018). Caracterización poblacional de la cuenca hidrográfica Mira-Mataje. *SATHIRI*, 6(9). <https://doi.org/10.32645/13906925.276>
- Thies, B., Meyer, H., Nauss, T., & Bendix, J. (2014). Projecting land-use and land-cover changes in a tropical mountain forest of Southern Ecuador. *Journal of Land Use Science*, 9(1), 1-33. <https://doi.org/10.1080/1747423X.2012.718378>
- Thompson, J. B., Zurita-Arthos, L., Müller, F., Chimbolema, S., & Suárez, E. (2021). Land use change in the Ecuadorian páramo: The impact of expanding agriculture on soil carbon storage. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 53(1), 48-59. <https://doi.org/10.1080/15230430.2021.1873055>
- Tolessa, T., Senbeta, F., & Kidane, M. (2017). The impact of land use/land cover change on ecosystem services in the central highlands of Ethiopia. *Ecosystem Services*, 23, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.11.010>
- Ulloa-Espíndola, R., & Martín-Fernández, S. (2021). Simulation and Analysis of Land Use Changes Applying Cellular Automata in the South of Quito and the Machachi Valley, Province of Pichincha, Ecuador. *Sustainability*, 13(17), 9525. <https://doi.org/10.3390/su13179525>
- van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L., & Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2(7), 494-501. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>
- Verburg, P. H., Neumann, K., & Nol, L. (2011). Challenges in using land use and land cover data for global change studies: LAND USE AND LAND COVER DATA FOR GLOBAL CHANGE STUDIES. *Global Change Biology*, 17(2), 974-989. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x>
- Verburg, P. H., Van Eck, J. R. R., De Nijs, T. C. M., Dijst, M. J., & Schot, P. (2004). Determinants of Land-Use Change Patterns in the Netherlands. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 125-150. <https://doi.org/10.1068/b307>
- Wang, J., Zhang, J., Xiong, N., Liang, B., Wang, Z., & Cressey, E. (2022). Spatial and Temporal Variation, Simulation and Prediction of Land Use in Ecological Conservation Area of Western Beijing. *Remote Sensing*, 14(6), 1452. <https://doi.org/10.3390/rs14061452>

- Wang, S. W., Munkhnasan, L., & Lee, W.-K. (2021). Land use and land cover change detection and prediction in Bhutan's high altitude city of Thimphu, using cellular automata and Markov chain. *Environmental Challenges*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100017>
- Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nature communications*, 12(1), 2501. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2>
- Yatoo, S. A., Sahu, P., Kalubarme, M. H., & Kansara, B. B. (2022). Monitoring land use changes and its future prospects using cellular automata simulation and artificial neural network for Ahmedabad city, India. *GeoJournal*, 87(2), 765-786. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10274-5>
- Zhai, R., Zhang, C., Li, W., Zhang, X., & Li, X. (2020). Evaluation of Driving Forces of Land Use and Land Cover Change in New England Area by a Mixed Method. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 350. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060350>

Análisis de la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la Patagonia árida bajo distintos escenarios

Analysis of water erosion susceptibility at an arid Patagonia watershed in different scenarios

AUTORÍA

Valeria Aramayo

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, Modesta Victoria 4450, San Carlos de Bariloche, Argentina.

Marcelo Nosetto

Instituto de Matemática Aplicada San Luis (IMASL) - Universidad Nacional de San Luis - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (UNSL-CONICET), San Luis, Argentina.
Cátedra de Climatología Agrícola (FCA-UNER), Ruta 11, km 10, Oro Verde, Entre Ríos E3101, Argentina.

María Victoria Cremona

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, Modesta Victoria 4450, San Carlos de Bariloche, Argentina.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25246>

CITACIÓN

Aramayo, V., Nosetto, M., & Cremona M.V. (2024). Análisis de la susceptibilidad a la erosión hídrica en una cuenca de la Patagonia árida bajo distintos escenarios. *Investigaciones Geográficas*, (81), 181-199. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25246>

CORRESPONDENCIA

Valeria Aramayo (aramayo.valeria@inta.gob.ar)

HISTORIA

Recibido: 4 julio 2023

Aceptado: 22 septiembre 2023

Publicado: 26 enero 2024

(Publicación anticipada: 14 diciembre 2023)

TÉRMINOS

© Valeria Aramayo, Marcelo Nosetto y María Victoria Cremona

 Este trabajo se publica bajo una licencia Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Resumen

La erosión hídrica es una de las principales causas de degradación de tierras. Las estimaciones de erosión son fundamentales para la optimización de estrategias de conservación de suelos. Por eso estudiamos la susceptibilidad a la erosión hídrica y sus factores predisponentes en una cuenca de la región árida de la Patagonia norte, con el modelo USLE (siglas en inglés para Ecuación Universal de Pérdida de Suelo). Empleamos herramientas de teledetección, SIG, y análisis de componentes principales para evaluar el escenario promedio de pérdida de suelo. Además, evaluamos los cambios en la erosión estimada bajo tres escenarios posibles de acuerdo a modificaciones en la cobertura y la intervención sobre los humedales. La tasa estimada de pérdida de suelo por erosión hídrica promedió 27 t ha⁻¹ año⁻¹ con distintos grados de afectación en el área. Éstos resultados fueron convergentes con la cantidad de sedimentos en suspensión colectados en tres arroyos de la cuenca. El factor que depende de la pendiente del terreno fue el que mostró el mayor control sobre la variabilidad de la erosión hídrica. Entre los escenarios planteados, las mayores diferencias con respecto a la situación promedio correspondieron a cambios en la erosividad en las precipitaciones más que a cambios en la cobertura o intervenciones en mallines. La extensión espacial del análisis fue posible gracias a la combinación de las herramientas empleadas y brinda un contexto acorde a la complejidad de los procesos ecológicos. Los resultados de este trabajo ponen de manifiesto la existencia de áreas sensibles a la erosión hídrica y permiten establecer prioridades y/o alcances de las decisiones para el cuidado de los recursos naturales en zonas áridas como esta porción de la Patagonia.

Palabras clave: erosión hídrica; USLE; pérdida de suelo; Patagonia árida; variabilidad espacial; sedimentos.

Abstract

Erosion estimates are essential for optimizing soil conservation strategies. Water erosion is one of the main causes of land degradation. Our aim is to study the susceptibility to water erosion and its driving factors of a watershed in the arid northern Patagonia region, using the USLE model (Universal Soil Loss Equation). Remote sensing, GIS and principal component analysis tools have been used to evaluate the average soil loss scenario. In addition, we have also tested soil erosion changes in three possible scenarios according to coverage modifications and

anthropic intervention in wetlands. The estimated water erosion rate averaged $27 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ but showed high variability in the area. These results concur with the amount of suspended sediments collected in three streams of the basin. The terrain slope factor was shown to exert the greatest control on the variability of water erosion. Among the proposed scenarios, the greatest differences with respect to the average situation corresponded to changes in the erosivity of precipitation rather than changes in coverage or interventions in wetlands. The spatial extension of the analysis was possible due to the combination of the tools used and provided a context that reflected the complexity of the ecological processes. Our results reveal the existence of areas that are sensitive to water erosion, enabling us to establish priorities or scopes of decision with respect to natural resources awareness in arid zones such as this part of Patagonia.

Keywords: water erosion; USLE; soil loss; Arid Patagonia, spatial variability; sediments.

1. Introducción

A nivel mundial, la erosión por acción del agua es la forma más común de degradación de tierras (Li & Fang, 2016). En pastizales naturales es uno de los principales procesos de pérdida de suelo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016), y en zonas áridas contribuye sustancialmente a la desertificación (Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación [UNCCD], 1994). Las actividades humanas pueden acelerar la pérdida de suelo a través de su impacto sobre la cobertura y las propiedades físicas edáficas (Thurow, 1991). En particular, las actividades agropecuarias tienden a alterar las condiciones naturales del suelo y a promover su mayor susceptibilidad a erosión por sobrepastoreo, deforestación y otras prácticas agrícolas inadecuadas, que acentúan el problema con efectos tanto en el sitio como fuera de él (Lal, 2016; Yu et al., 2022).

Las estimaciones locales de erosión son fundamentales para la optimización de estrategias de conservación de suelos, por eso se abordan en múltiples países, lo cual refleja la severidad de esta problemática y su amplia distribución en distintos ambientes (García-Ruiz et al., 2017; Li & Fang, 2016). La susceptibilidad a la erosión hídrica de una determinada región puede abordarse mediante el uso de modelos que estiman la pérdida de suelo, como por ejemplo la ecuación universal de pérdida de suelo USLE (Universal Soil Loss Equation) (Wischmeier & Smith, 1965). Éste es un método ampliamente aceptado para predecir la tasa de erosión en cualquier región y cualquier combinación de suelo, topografía, clima, cobertura y prácticas de manejo (Alewell et al., 2019). En zonas áridas, explicar la generación de escurrimientos y erosión de suelo es especialmente difícil dada la intermitencia y discontinuidad de los flujos y la gran variabilidad de las precipitaciones (De Vente & Poesen, 2005). La USLE permite evaluar el impacto de prácticas de control de erosión en varios usos de la tierra, incluidos los pastizales (Renard & Foster, 1985; Xiong et al., 2019), interpretar los componentes y procesos que la regulan, y plantear escenarios y efectos del cambio climático (Yang et al., 2003). La disponibilidad de información de sensores remotos y la posibilidad de analizarlos en softwares con gran capacidad de procesamiento brindan una oportunidad para el abordaje de procesos complejos en regiones remotas como la Patagonia árida argentina.

Por otro lado, los eventos climáticos extremos favorecen la generación de escurrimientos y arrastre de material. Las zonas áridas, que cubren aproximadamente un 45 % de la superficie terrestre (Praválie, 2016), reciben lluvias menores a la evapotranspiración potencial durante al menos una porción del año, y sus suelos presentan déficit hídrico estacional o permanente (D'odorico & Poporato, 2006). A pesar de ello, ciertas combinaciones de factores pueden llevar a la pérdida de suelo por erosión hídrica en estas regiones y a una retroalimentación positiva (auto-acelerada) de disminución en la calidad de las tierras (Le Houerou, 1996).

La Patagonia argentina es una de las regiones áridas donde las condiciones climáticas adversas, conjuntamente con medidas de manejo de pastizales inapropiadas, favorecen en muchos casos la degradación (Spinoni et al., 2015). Esas condiciones adversas reducen la fertilidad del suelo ya que actúan directamente sobre las capas superiores donde se encuentran la mayoría de los nutrientes (Lal, 2003), y en particular el carbono orgánico (Gaitán et al., 2009; Enriquez et al., 2020). En esta región, el deterioro antrópico de los pastizales naturales se inició hace unos 200 años con el establecimiento de los colonos europeos (Fernández & Busso, 1999) y la expansión de la ganadería extensiva como forma de uso de suelo mayoritaria. Desde entonces, y al igual que en otras regiones similares (Australia, Sudáfrica), la producción de lana y carne se orientó a satisfacer la demanda del mercado exterior y el cuidado de la tierra fue relegado (Defossé & Robberecht, 1987).

La cobertura vegetal en una cuenca actúa como regulador de la cantidad, la temporalidad y la calidad del agua de escurrimiento y el aporte de sedimentos a los cauces. El estado y funcionalidad de los pastizales

patagónicos han sido estudiados mediante índices espectrales derivados de imágenes de satélite desde hace más de 20 años, y actualmente se acepta al NDVI como un estimador confiable de la cobertura vegetal (Paruelo & Golluscio, 1994; Irisarri et al., 2012; Gaitán et al., 2013; Bandieri et al., 2020). El manejo adecuado del pastoreo es determinante de la cobertura de la vegetación y por lo tanto de la conservación del suelo y el agua (Golluscio et al., 1998; Hopmans, 2019). En pos de conservar el suelo, en la Patagonia norte argentina existen prácticas recomendadas tales como la evaluación y planificación del uso del pastizal, y la restauración de *mallines*¹ por redistribución del agua de escurrimiento (Siffredi et al., 2015; SAyDS, 2018; Cremona et al., 2019). Esta última práctica ha sido promovida por financiamiento público desde la década del 2000 y se basa en el control y distribución del agua enfocado en la sub-irrigación desde canales de recarga, sin pendiente, que aumentan la humedad del suelo por infiltración y elevan la altura del nivel freático, permitiendo la recuperación de la cobertura de mallines degradados (Horne, 2010; Boggio et al., 2019).

En el manejo de cuencas, la cantidad de sedimentos en un curso o reservorio de agua es de sumo interés (Walling & Collins, 2008) y puede variar en el espacio y en el tiempo. Si bien la producción de sedimentos es un proceso natural, la emisión de sedimentos en exceso puede indicar erosión de suelo no deseada y afectar la calidad del agua, la estabilidad de los cauces, las obras de conducción y reservorio, y la infraestructura de abastecimiento (Brooks et al., 2013). Existen limitaciones para vincular la producción y transporte de sedimentos con las tasas de erosión, como movimientos de suelo por causas ajenas al flujo de agua que reducen o aumentan la cantidad de material que llega al área de recolección (Walling, 1983; García Ruiz et al., 2017). Pese a ello, varios autores han encontrado relaciones significativas entre la pérdida de suelo modelada y los sedimentos en los cauces (De Vente et al., 2013).

Estimaciones basadas en modelos tipo USLE se emplearon en nuestro país para varios ambientes y con diferente nivel de detalle, pero aún es necesario evaluar su performance en zonas áridas bajo uso pastoril y a una escala adecuada. La tasa de erosión hídrica actual estimada para Argentina se ha informado recientemente con resolución de 250 m, como resultado del modelo USLE (Gaitán et al., 2017). Metodologías similares, que combinan datos espacialmente explícitos con información de sensores remotos a escala de cuenca, se han aplicado a cuencas andinas y de otras regiones del país (Rienzi et al., 1999; Orúe et al., 2007; Behrends Kraemer et al., 2013; Rodríguez Vagaría & Gaspari, 2015); y a escala de lotes o parcelas, la mayoría sobre cultivos y muy pocas sobre cobertura natural (Vich & Mariani, 2010). En pastizales del este de la Patagonia, Chartier y Rostagno (2010) estudiaron la generación de escurrimientos y pérdida de suelo en parcelas usando el modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Flanagan & Nearing, 1995) y encontraron una baja eficiencia en la predicción de escurrimiento y la producción de sedimentos. El abordaje a una escala intermedia entre la parcela y la región nos acerca a la escala de toma de decisiones a nivel de establecimientos agropecuarios, por eso elegimos la cuenca hidrográfica, un espacio donde se vinculan los recursos naturales superando los límites antrópicos (Thurow, 2000).

El objetivo de este trabajo fue estudiar la susceptibilidad a la erosión hídrica y sus factores predisponentes en una cuenca de la región árida de la Patagonia norte argentina. Para eso estimamos la tasa de pérdida de suelo con el modelo USLE basado en información ráster de cinco factores generados a partir de datos históricos y fuentes secundarias e información remota, y evaluamos cómo varían en el espacio los factores y el resultado del modelo. Además, propusimos distintos escenarios de cambios en la cobertura vegetal y prácticas de manejo para evaluar el comportamiento del modelo. Por último, relacionamos la tasa de pérdida de suelo con los sedimentos en suspensión colectados en tres arroyos de la cuenca para contrastar con los valores estimados por el modelo.

2. Metodología

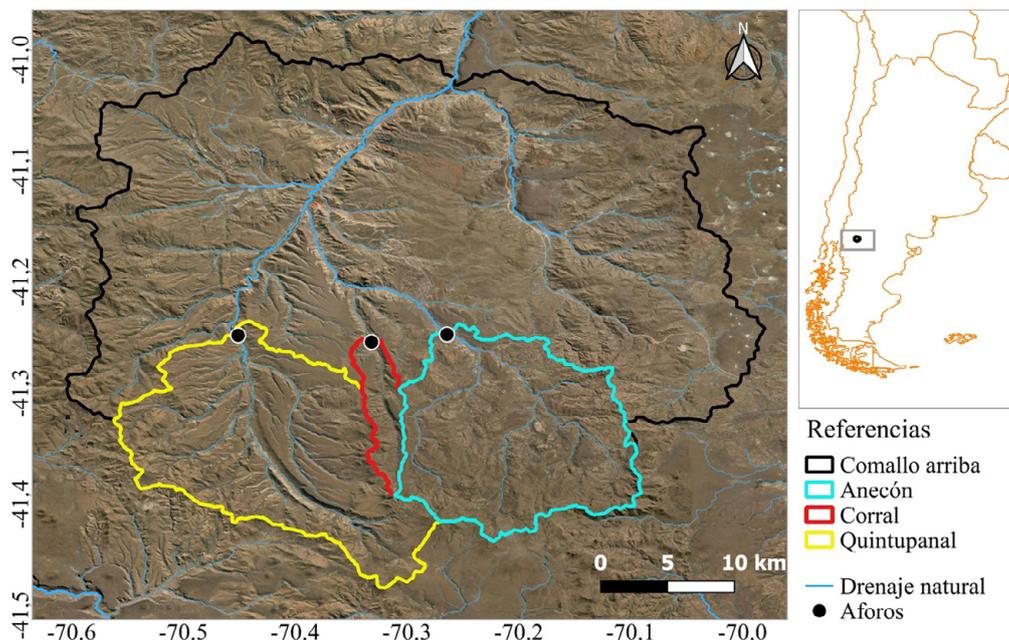
2.1. Área de estudio

El área de estudio es la cuenca alta del arroyo Comallo, en la región semiárida de la provincia de Río Negro, Argentina (41,02° Sur; 70,2° Oeste), con aproximadamente 2.000 km² (Figura 1). El arroyo Comallo recorre cerca de 120 km en sentido sur-norte, de una topografía quebrada, con altitudes de entre 700 y 1.990 m s.n.m., tiene pocos afluentes y variaciones estacionales de caudal muy marcadas. El clima de esta zona corresponde a la categoría BSk de Köppen, de estepa fría, semiárida, con nevadas en los campos altos, lluvias invernales y marcado déficit de humedad en el verano. La precipitación media anual es de 224 mm, las temperaturas medias son de 16,4°C para el mes de enero y de 2,3°C para julio (Massaferro et al., 2012; Gaitán

¹ Mallines: denominación local de los humedales que proviene de la lengua mapuche en referencia a tierras pantanosas e inundables.

et al., 2004). La forma de uso de la tierra es el pastoreo, principalmente por ganadería de cría ovina y bovina extensiva (Gaitán, 2017). En el punto de cierre del área de estudio se ubica la localidad de Comallo con 1.497 habitantes y tendencia creciente de la población (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INDEC], 2023).

Figura 1. Cuenca alta del arroyo Comallo y subcuencas de la cabecera (panel izquierdo) con su ubicación en Argentina (panel derecho)



Elaboración propia

El relieve de la zona incluye sierras y colinas, mesetas basálticas, mesetas sedimentarias, peniplanicies y bajos (Ayesa et al., 1995). La mayoría de los suelos presenta un horizonte superficial arenoso o franco-arenoso de escaso desarrollo y están caracterizados por un fuerte déficit hídrico anual, de 6-8 meses. En cambio, en las llanuras aluviales de los principales arroyos y en los humedales existen suelos desarrollados en un ambiente hidromórfico, con abundante materia orgánica superficial y una napa de agua oscilante subsuperficial (0-2 m) (Gaitán et al., 2004).

Los pastizales que dominan en Patagonia son las estepas arbustivo-graminosas y estepas arbustivas. Tienen una cobertura vegetal aproximada de 30-50 % donde los principales elementos florísticos son: *Mulinum spinosum*, *Senecio filaginoides* y *Nassauvia axilaris* entre los arbustos, y *Pappostipa* ssp., *Jarava* ssp, *Festuca argentina* y *Poa ligularis* entre los pastos (León et al., 1998; Gaitán, 2017). La cobertura de hierbas anuales en el área de estudio no supera el 1 % y la de material senescente y muerto en pie varía entre 4 y 11 %, según lecturas de sitios del sistema de Monitoreo Ambiental para Regiones Áridas y Semiáridas MARAS (Oliva et al., 2020). Los mallines son praderas húmedas sobre los suelos azonales, en las partes bajas del paisaje, cubiertas por juncáceas, ciperáceas y gramíneas. La productividad de los mallines es de 5 a 20 veces superior a la de la estepa circundante, su contribución a la producción forrajera puede ir del 10 al 50 % (Buono et al., 2010), por lo cual son muy valorados en los sistemas ganaderos (Villagra et al., 2013), y son la principal reserva de carbono orgánico del suelo en la Patagonia árida (Histosoles; Enriquez et al., 2020).

2.2. Susceptibilidad a erosión hídrica

2.2.1. Modelo de estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica

Utilizamos el modelo USLE que estima la pérdida de suelo (A) como producto de cinco factores (Ecuación 1). Para cada uno de los factores obtuvimos una capa ráster en base a datos georreferenciados compilados con el software libre QGIS (Qgis.org, 2021).

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{Ecuación 1})$$

A: pérdida de suelo promedio anual ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

R: erosividad de las lluvias ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)

K: erodabilidad del suelo ($t.MJ^{-1}.mm^{-1}$)

LS: factor topográfico de longitud y gradiente de pendiente (adimensional)

C: cobertura/uso de la tierra (adimensional)

P: prácticas de conservación de suelo (adimensional)

2.2.2. Generación de rasters de los factores y resultado del modelo

El factor R, que representa la erosividad de las lluvias, se obtuvo por las Ecuaciones 2 y 3 (Arnoldus, 1977) en forma puntual con los datos históricos de las estaciones pluviométricas de Comallo (-41,11; -70,38), Pilcañeu (-41,15; -70,68), Las Bayas (-41,46; -70,67), Río Chico (-41,71; -70,48), Corralito (-40,72; -70,71) y Maquinchao (-41,25; -68,70).

$$R = 0,264 F^{1.5} * 1,735 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Con F calculado de la forma:

$$F = \sum_{i=1}^{12} pi^2 / P \quad (\text{Ecuación 3})$$

pi = precipitación mensual en mm

P = precipitación anual en mm

Los valores puntuales de R se interpolaron en SAGA (Conrad, 2006) con el método Thin Plate Splines (Mitas & Mitasova, 1999), seleccionado por la baja densidad de puntos disponibles. Así generamos un ráster con píxeles de 100 m de resolución del factor R promedio para el período 1965-2019.

El factor K, de erodabilidad del suelo, se determinó por el nomograma de Wischmeier y Smith (1978) que contempla la textura, el porcentaje de materia orgánica y la permeabilidad de los suelos. Los valores para esos atributos del suelo se obtuvieron de la caracterización de los suelos dominantes de las unidades cartográficas del área identificadas por Godagnone y Bran (2009) y López et al. (2005) y georreferenciadas por el Laboratorio de Teledetección del INTA EEA Bariloche (Tabla 1). Las características del suelo de mallín para esta zona fueron brindadas por el laboratorio de suelos EEA Bariloche INTA. En el período de tiempo analizado, asumimos valores de K constantes.

Tabla 1. Unidades de suelo en la cuenca alta del Comallo con las características que definen su erodabilidad

Unidad cartográfica	Clasificación de Suelo (dominante)	$A_{\text{fina}} + \text{limo}$ (%)	A (%)	% MO	Permeabilidad	K
UC 20 y 23	Haplargide lítico xérico, grueso	34	67	0,96	Moderada	0,14
UC 19	Haplargide típico/xerortente lítico grueso	54,5	44	0,38	Moderada a rápida	0,25
UC 50	Haplargide lítico xérico, grueso	28	78	0,5	Moderada a rápida	0,2
UC 14	Haploxerol éntico	34,15	71	0,54	Rápida	0,18
MALLINES	Endoacuol cumúlico	70	30	6	Lenta a moderada	0,39

UC: Unidad cartográfica; A: Arena; MO: Materia Orgánica; K: erodabilidad

Fuente: Godagnone & Bran (2009), López et al. (2005). Elaboración propia

Los factores L y S, referidos al largo y gradiente de la pendiente, se generaron con la Ecuación 4 (Moore et al., 1991) en el software SAGA a partir del modelo digital de elevación SRTM V3 (Shuttle Radar Topography Mission) (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio [NASA], 2013), de alrededor de 30 m de resolución espacial, adquirido del sitio web de libre acceso earthexplorer.usgs.gov. En el período analizado, supusimos valores de LS constantes.

$$LS = 1,4 (As)^{0,4} / 22,13 * (\sin\beta)^{1,3} / 0,0896 \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

As = Área de contribución específica (m^2), referida al área de aporte hasta cada punto en la pendiente

β = Ángulo de la pendiente (radianes)

El factor C, que disminuye a medida que aumenta la cobertura, se estimó en base al NDVI, considerado un índice espectral válido para estudios de la cobertura vegetal en pastizales naturales de Patagonia (Paruelo

& Golluscio, 1994; Gaitán et al., 2013). Las estepas arbustivas y arbustivo-graminosas que dominan el área presentan NDVI máximos en noviembre-diciembre y tienen pequeña variación entre años (Puelo et al., 2004; Bandieri et al., 2020). Por ese motivo utilizamos los máximos NDVI de cada año, procurando capturar el pico de actividad fotosintética del pastizal natural y aumentar la representación de la cobertura vegetal total (Duncan et al., 1993; Senay & Elliot, 2002). La fuente de datos fue el producto NDVI de Landsat 8, de 2015 a 2019, con resolución espacial de 30 m x 30 m, obtenido de Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Así, calculamos los valores del factor C mediante la Ecuación 5 (Van der Knijff et al., 1999), la que ha mostrado resultados aceptables en otros estudios (Van der Knijff et al., 2000; Alexakis et al., 2013; Yohannes et al., 2021), con $\alpha=4$ y $\beta=1$, para cada año.

$$C = e^{\left[-\alpha \frac{NDVI}{\beta - NDVI}\right]} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Para el factor P, que representa a las prácticas de conservación, se presentan dos valores alternativos: se designó con un valor de 0,8 a los mallines con obras para manejo del agua de escurrimiento y con 1 a toda la superficie restante, sin prácticas de manejo. Esas áreas se delimitaron en base a informes de obras provistos por los propietarios de los establecimientos en la cuenca, interpretación visual de imágenes de alta resolución espacial y trazado de polígonos en forma manual. El valor de 0,8 contempla ambientes de lluvias estacionales y pendiente menor a 15 % (FAO, 1980; Morgan, 2005).

Una vez elaborados los rasters con los cinco factores del modelo, todos llevados a resolución de 30 m, estimamos la tasa de pérdida de suelo de la cuenca. En primer lugar, obtuvimos la pérdida de suelo por erosión hídrica potencial (Apot) como producto de los factores R, K y LS. Luego, con el producto de Apot por los factores C y P obtuvimos la pérdida de suelo por erosión hídrica actual (A) promedio.

2.2.3. Análisis de los factores y el resultado del modelo

Para analizar la relación entre las seis variables: A, R, K, LS, C, P, y comprender cuáles se asocian en mayor medida a la variabilidad de la pérdida de suelo estimada se realizó un ordenamiento por el método de componentes principales (McGarigal et al., 2000). El análisis incluyó a todos los píxeles de la cuenca con el valor correspondiente a las seis variables y se realizó en R con las librerías Raster (Hijmans et al., 2015) y FactoMineR (Husson et al., 2016). Para facilitar la interpretación se graficó el valor de A (pérdida de suelo estimada) en función de cada uno de los cinco factores del modelo.

2.3. Variación de la USLE en el tiempo: planteo de escenarios

Complementario a lo anterior, empleamos la USLE para estimar la pérdida de suelo en tres escenarios para la cuenca alta del Comallo: [1] Menor protección por cobertura vegetal, [2] Mayor protección por cobertura vegetal y [3] Prácticas de conservación de suelos extendidas a todos los mallines del área. El factor C, referido a la cobertura, fue diferente en cada uno de los primeros dos escenarios, pero también lo fue el factor R, contemplando que las condiciones de crecimiento de la cobertura vegetal dependen, en parte, de las precipitaciones de cada año (Fabricante et al., 2009). El factor P fue el único que se modificó en el escenario [3]. Por su parte, los factores LS y K que se supusieron constantes en el tiempo abordado en este trabajo, propios de la historia de formación de los paisajes y suelos de la cuenca. Los escenarios de menor y de mayor efecto protector de la cobertura vegetal se identificaron a partir del cálculo del factor C con la Ecuación 5 usando el $NDVI_{\text{máximo}}$ de NOAA-AVHRR para el período 1981 a 2018. De esta serie obtuvimos los promedios, máximos, mínimos y el coeficiente de variación temporal. En función de ese análisis seleccionamos el año 2013 para el escenario [1] de menor protección por baja cobertura, con mayores valores del factor C. En el otro extremo, el año 2018 fue seleccionado para el escenario [2] de mayor cobertura vegetal, con valores menores de C. Identificados esos dos años, y sacando provecho de la disponibilidad de imágenes de mayor detalle espacial, calculamos nuevamente el factor C con los productos de Landsat 8 para lograr un raster del factor C_{2013} y otro raster del C_{2018} , ambos de 30 m x 30 m. Dado que el factor R también cambia según la distribución intra-anual de las precipitaciones, para cada uno de los escenarios de menor y mayor cobertura se generó el raster del factor R_{2013} y R_{2018} con las Ecuaciones 2 y 3 en base a los datos correspondientes de las estaciones citadas anteriormente. En el caso del escenario [3] se empleó el R promedio histórico calculado en la sección 2.2. Por otra parte, en el escenario [3] de prácticas de conservación extendidas a todos los mallines aptos, tal aptitud para obras de restauración y conservación de suelo se definió de acuerdo con la cartografía de López et al. (2005) considerando adecuadas para esta práctica a todas las áreas descritas como mallín muy húmedo, mallín húmedo y mallín subhúmedo.

Cada ráster de pérdida de suelo estimada (A) en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, se reclasificó en QGIS siguiendo la escala de FAO (1980) de la forma: “Leve” hasta $10\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, “Moderada” hasta $50\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, “Alta” hasta $200\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ y “Muy alta” cuando supera $200\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$. La proporción de superficie afectada por esas clases de erosión se informa como indicador de la sensibilidad del modelo a los cambios planteados en cada escenario.

2.4. Sedimentos en suspensión

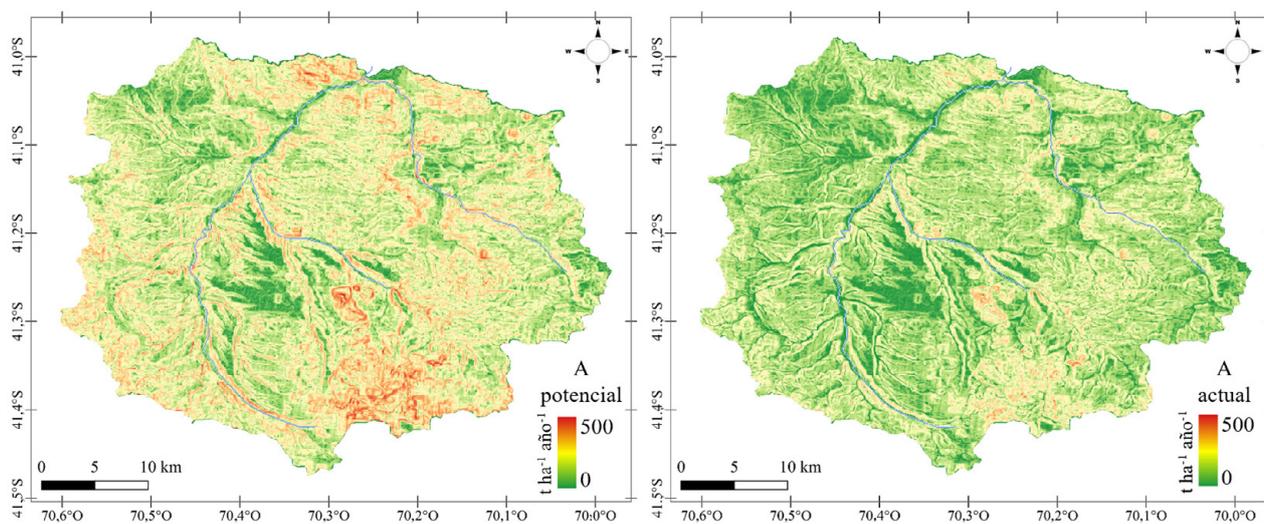
A fin de cotejar las salidas del modelo USLE con información de campo, se realizó un muestreo de sedimentos en suspensión durante 2018 y 2019 en los puntos de salida de tres sub-cuencas en las nacientes del Comallo: Quintupanal ($41,24^{\circ}S$; $70,46^{\circ}O$) con una superficie de 32.300 ha, Corral ($41,24^{\circ}S$; $70,33^{\circ}O$) con 3.500 ha y Anecón ($41,24^{\circ}S$; $70,27^{\circ}O$) con 27.800 ha (ver Figura 1). Se emplearon colectores de sedimentos en suspensión (Phillips et al., 2000) por duplicado en cada cauce desde julio hasta diciembre de ambos años, ya que en ese período se estimaba incluir el máximo caudal. Los colectores fueron construidos con tubos de PVC de 110 mm x 1 m de largo, con un orificio de entrada y otro de salida de 4 mm de diámetro dados por caños de 15 cm de largo, de modo que la alteración del régimen de flujo producido por el cambio de sección al ingreso permite la sedimentación de las partículas transportadas. Luego de la temporada de crecida de los arroyos, el contenido de cada tubo se llevó a estufa y se obtuvo el peso seco de las muestras. Para los dos años muestreados, 2018 y 2019, repetimos la aplicación de la USLE (Ecuación 1), ahora con los factores C y R correspondientes a estos años para obtener la pérdida de suelo por erosión hídrica actual A ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$) de cada sub-cuenca. Es importante aclarar, que los sedimentos capturados en cada cauce contribuyen a la interpretación del proceso de transporte de material, pero no pretende estar vinculado directamente en forma numérica a la tasa de erosión de suelos estimada en la cuenca de aporte (Ares et al., 2014) ya que intervienen distintos factores en ambos procesos. Más allá de esa limitación, se evaluó la relación entre la erosión hídrica actual estimada y la cantidad de sedimentos (g/colector) en cada uno de los tres cauces mediante un análisis de correlación.

3. Resultados

3.1. Estimación de la susceptibilidad a erosión hídrica

El modelo USLE estimó una pérdida de suelo por erosión hídrica (A) importante para la cuenca alta del arroyo Comallo, a pesar de encontrarse en una zona árida con alrededor de 200 mm de precipitación anual. La estimación de pérdida de suelo potencial en la cuenca resultó en un promedio de $58\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$, correspondiente a la clase Alta de la escala de FAO. Por otra parte, la pérdida de suelo actual, que incorpora los factores de cobertura de suelo y prácticas de manejo resultó en $27\ t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ (Figura 2), correspondiente a la clase Moderada. Los mayores valores de pérdida de suelo, tanto actual como potencial, se ubicaron en el sudeste de la cuenca y los mínimos en los valles y planicies de toda el área de la cuenca.

Figura 2. Pérdida de suelo potencial y actual $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ en la cuenca alta del arroyo Comallo

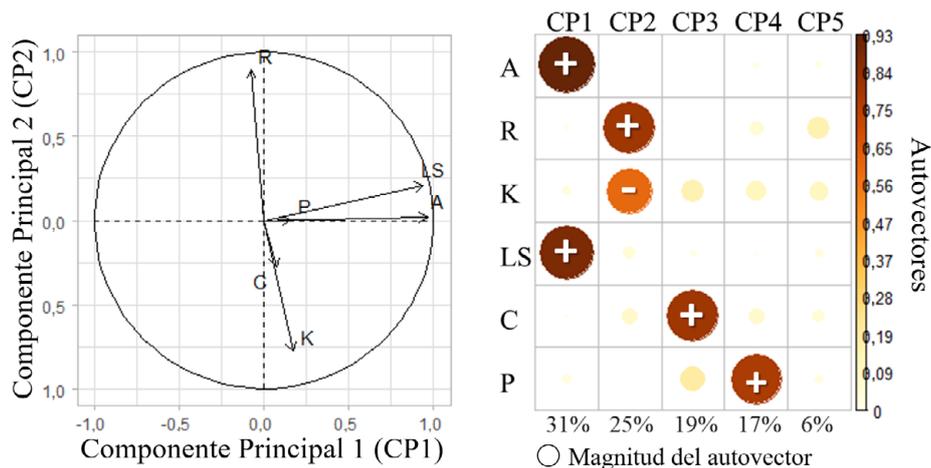


Elaboración propia

Los factores que predisponen a la erosión hídrica presentaron variabilidad espacial dentro de la cuenca alta del Comallo (Figura 6). La erodabilidad del suelo, K, varió entre 0,14 y 0,39, y presentó valores mínimos en prácticamente toda la mitad oeste de la cuenca (49 % de la superficie) donde dominan suelos de texturas gruesas. La mayoría de la mitad restante (46 %) correspondió al valor 0,25, mientras que los valores máximos (0,39) se ubicaron en las líneas de drenaje natural, cubriendo el 3 % de la cuenca, con suelos de texturas finas, drenaje lento y mayor contenido de materia orgánica. El factor LS varió entre 0 y 18 en función de los distintos relieves, con un promedio de 2.4 correspondiente a topografías plano-onduladas, y sus máximos se ubicaron en las sierras del sudeste y en las laderas de toda la cuenca. La erosividad de las precipitaciones, R, promedio para la cuenca fue de 127 MJ mm ha⁻¹ año⁻¹, con valores históricos entre 117 y 217 MJ mm ha⁻¹ año⁻¹. El factor C fue en promedio de 0,3, con mínimos cercanos a cero en los mallines del oeste de la cuenca y con máximos cercanos a 0,8 en los caminos sobre el noreste de la cuenca y en los afloramientos rocosos dominantes al este. El factor de prácticas de conservación de suelo, P, con valor de 0,8 se ubicó en algunos mallines en el sur y oeste de la cuenca, con un total de 0,4 % del área, mientras en la gran mayoría de la superficie no se reconocieron prácticas de conservación (Figura 6).

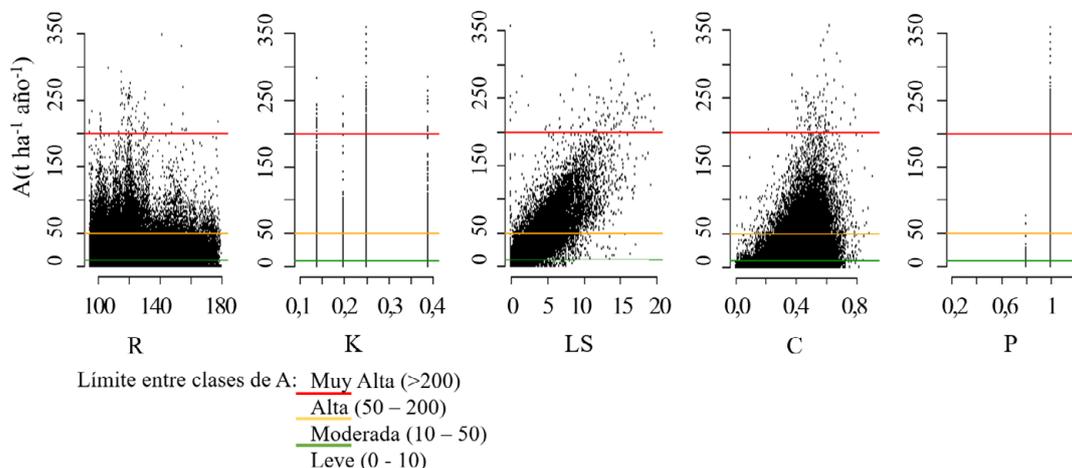
La variación del factor de longitud y gradiente de la pendiente (LS) fue la más relacionada a la de la tasa de pérdida de suelo en el análisis local de la cuenca (pixel a pixel). Esto resulta del ordenamiento donde los primeros dos componentes mostraron una variación en la misma dirección entre A y LS (CP1) y una variación de R opuesta al factor K (CP2) (Figura 3). Estos primeros dos ejes representan el 57 % de la variancia total y sigue el componente 3, con 19 % de variancia, en cuya variación hay gran participación del factor C.

Figura 3. Resultados del análisis de componentes principales para todos los píxeles con las 6 variables: A, R, K, LS, C y P



Elaboración propia

Figura 4. Relación entre la pérdida de suelos actual (A) de cada píxel con cada uno de los factores del modelo USLE en la cuenca alta del Comallo



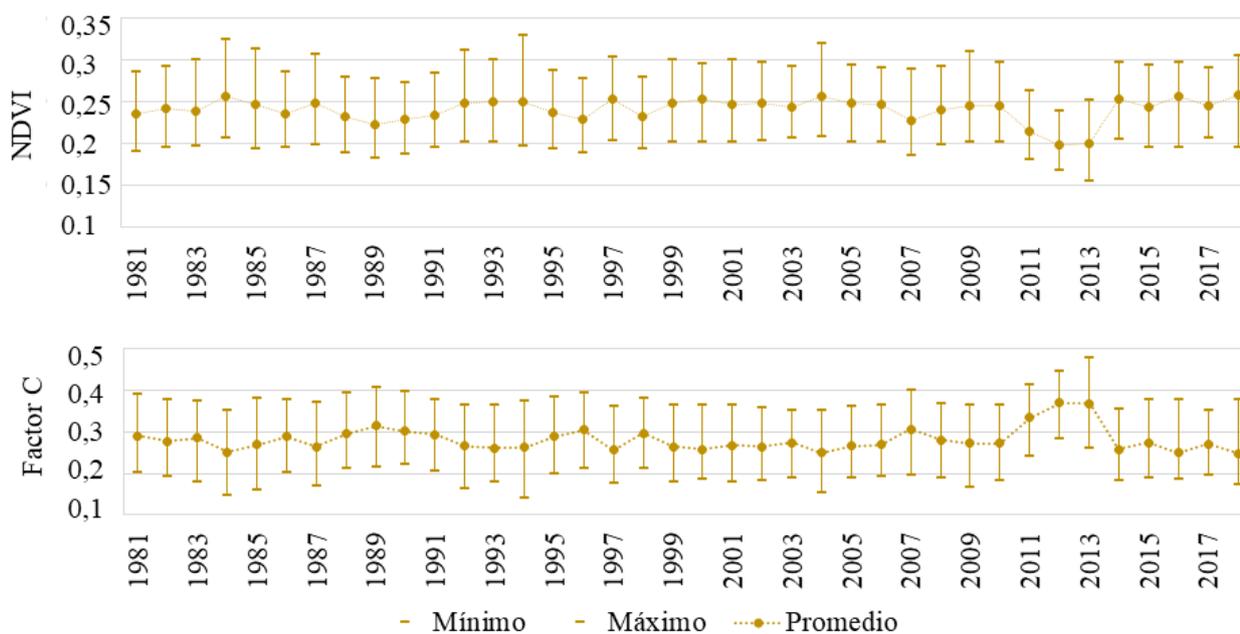
Elaboración propia

Para resumir, encontramos rangos de algunos factores que siempre se vinculan a cierta clase de erosión. Por ejemplo, valores menores a 5 del factor LS, de la pendiente, se corresponden con tasas de pérdida de suelo Leve, Moderada o Alta dependiendo de la erosividad de las precipitaciones. En el otro extremo, cuando el factor LS supera 14 unidades entonces la pérdida de suelos resulta Moderada, Alta o Muy alta. Para el factor C, si bien no hay una relación tan marcada como con LS, cuando C toma valores bajos, entre 0 y 0,15, la erosión hídrica actual es casi exclusivamente Moderada o Leve. Para los P de 0,8 no hay pérdida de suelo Muy alta. Los factores R y K cubren en todo su espectro las distintas clases de la estimación (Figura 4).

3.2. Variación de la USLE en el tiempo: planteo de escenarios

En la búsqueda de años contrastantes para el NDVI como estimador de la cobertura vegetal, se encontraron valores de NDVI alrededor de 0,25, con una variación menor al 10 % del promedio para 36 de los 38 años de la serie (Figura 5). La excepción fueron los años 2011, 2012 y 2013 que manifestaron una caída en el NDVI producto de la deposición de cenizas volcánicas del evento eruptivo Cautle-Puyehue (Ferreiro et al., 2020), y por lo tanto un factor C entre 20 y 30 % mayor al promedio. De esta manera, como ya se mencionó, se seleccionaron los años 2013 y 2018, por tener el mayor y menor factor C, respectivamente.

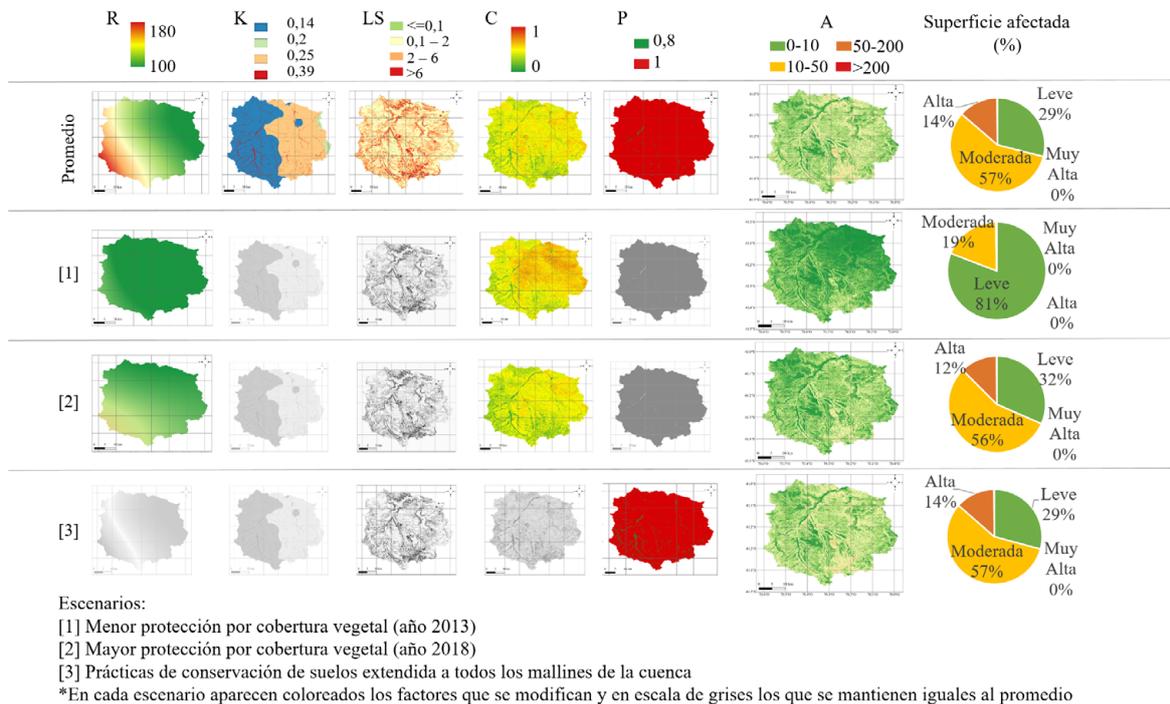
Figura 5. Evolución de los valores de NDVI y factor C, mínimo, máximo y promedio por año para la cuenca alta del Comallo de 1981 a 2018



Elaboración propia

La pérdida de suelo actual promedio de la cuenca alta del Comallo resultó mayormente Moderada (57 % de la superficie), luego Leve (29 %) y en menor medida Alta (14 %) (Figura 6). La aplicación de la USLE en los escenarios [1] Menor protección por cobertura vegetal y [2] Mayor protección por cobertura vegetal resultó diferente en pérdida de suelo respecto al Promedio. En cambio, no hubo diferencias entre el Promedio y el escenario [3] Prácticas de conservación de suelos extendidas a todos los mallines del área. En el escenario [1] el factor C fue superior al promedio (C2013= 0,37 promedio para la cuenca) mientras que el factor R disminuyó respecto al promedio. Esta combinación resultó en menor pérdida de suelos estimada para el área con un 81 % de la superficie en la clase de erosión Leve y 19 % Moderada. En el escenario [2] el factor C tomó valores menores (C2018= 0,24 promedio para la cuenca) y el factor R es mayor al de 2013, consecuentemente la proporción de superficie afectada por la clase de pérdida de suelos Moderada y Alta es mayor (56 y 12 % respectivamente), al tiempo que disminuye la Leve (32 %). En el escenario [3], la simulación de aumento del área de mallines con prácticas de conservación elevó a 3 % la proporción de superficie con factor P=0,8 que en el Promedio era de 0,4 %. Sin embargo, eso no modificó la proporción de clases de pérdida de suelos del Promedio a escala de cuenca (Figura 6).

Figura 6. Distribución espacial y proporción de la superficie afectada por clase de pérdida de suelo actual (A) como resultado del Promedio de los 5 factores (R, K, LS, C, P) y de tres escenarios: [1], [2], [3]



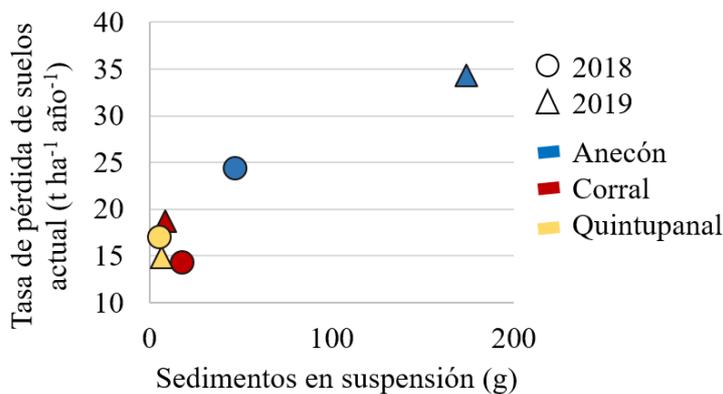
Elaboración propia

3.3. Sedimentos en suspensión

Para poder comparar los sedimentos en suspensión recolectados con la tasa de erosión estimada, se estimó nuevamente la pérdida de suelo para 2018 y 2019. En promedio para la cuenca alta del Comallo la tasa de pérdida de suelo para toda la cuenca fue de 23 t ha⁻¹ año⁻¹ en 2018 y de 43 t ha⁻¹ año⁻¹ en 2019, en función de un factor C que promedió 0,69 y 0,73, y un factor R que promedió 77 y 114 MJ mm ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. En concordancia con estas estimaciones, en el año 2019 se colectaron más sedimentos que en 2018.

Al confrontar los datos de las cantidades de sedimentos de los tres cauces con la estimación de la USLE por subcuenca, encontramos que a mayor tasa de pérdida de suelo estimada mayor cantidad de sedimentos en el cauce (r = 0,94). Las nacientes orientales del arroyo Comallo coinciden con la subcuenca Anecón cuya área de aporte presentó un promedio de pérdida de suelo de 24 y 34 t ha⁻¹ año⁻¹ para 2018 y 2019 respectivamente. En ese cauce los sedimentos en suspensión superaron en más de 10 veces a los del sudoeste. En las áreas de aporte del arroyo Quintupanal y del Corral predominan las clases Moderada y Leve con promedios de pérdida de suelo inferior a 20 t ha⁻¹ año⁻¹ en los dos años y los sedimentos en suspensión sumaron entre 5 y 20 g/colector (Figura 7).

Figura 7. Sedimentos en suspensión colectados en tres cauces de las nacientes del Comallo en relación a la Tasa de pérdida de suelos actual promedio para cada área de aporte



Elaboración propia

4. Discusión

La erosión hídrica es un proceso de degradación del suelo que alcanza regiones áridas de la Patagonia con distintos niveles de severidad de acuerdo a componentes del medio físico como la pendiente del terreno, la cantidad e intensidad de la lluvia y la erodabilidad, y también a las prácticas de manejo de la tierra que afectan a la cobertura de la superficie. En la cuenca estudiada, la estimación con el modelo USLE resultó en una tasa de pérdida de suelo mayormente Moderada (entre 10 y 50 t ha⁻¹ año⁻¹), con mínimos cercanos a 0 y máximos del orden de 500 t ha⁻¹ año⁻¹ (Figura 3). En estudios globales anteriores se ha estimado para las zonas áridas de Argentina de 5-10 t ha⁻¹ año⁻¹ (Borrelli et al., 2021) hasta 25-80 t ha⁻¹ año⁻¹ (Li & Fang, 2016). Para la zona de estudio, el mapa nacional de pérdida de suelo por erosión hídrica estimó entre 2 y más de 30 t ha⁻¹ año⁻¹ (Gaitán et al., 2017).

Dado que USLE es un modelo paramétrico multiplicativo, hay una relación directamente proporcional entre la variación de la magnitud de cada factor y el resultado de la estimación de pérdida de suelo. Además, las escalas espacial y temporal de análisis condicionan el resultado de la misma (Palacio et al., 2014; García-Ruiz et al., 2017; Morgan, 2005). La configuración espacial de los factores predisponentes en esta cuenca mostró que la topografía ejerce el mayor control sobre la variabilidad de la erosión hídrica magnificando o reduciendo el poder erosivo de las lluvias, que es el factor desencadenante (Figura 3). Ante un evento de precipitación erosiva mediado por la pendiente, las características del suelo que reducen su erodabilidad constituyen la principal barrera a la erosión, seguida por la cobertura vegetal (Figuras 3 y 4).

El largo y gradiente de la pendiente y la erodabilidad del suelo son resultado de largos procesos de desarrollo geomorfológico y edáfico, y modificarlas activamente en toda la cuenca y en el corto plazo sería difícil y costoso. Sin embargo, la implementación planificada de construcciones que disminuyen el factor pendiente al aumentar la tortuosidad y la rugosidad de la superficie, con flujos de agua más lentos, ha mostrado ser efectivo en otras regiones áridas del mundo (Bruins et al., 1986; Rango et al., 2006; Jahantigh & Pessarakli, 2009). Las obras de redistribución de agua en mallines cumplen una función similar en cuanto al aumento de la permanencia del agua en la cuenca, pero de acuerdo a las estimaciones realizadas en este trabajo, aún si se extendiera a los mallines de toda la cuenca, no se modificaría la proporción de las tasas de erosión más graves (Figura 6). Esto último permitiría suponer que, a escala de cuenca, los esfuerzos concentrados sólo en prácticas sobre los mallines tienen menor impacto que el que generarían acciones enfocadas en el mantenimiento o recuperación de la cobertura total a través del manejo del pastizal natural a escala de establecimientos. Más allá del alcance de la práctica, la implementación de las obras mencionadas en mallines ha mostrado resultados favorables a la escala local (Curcio et al., 2023).

Los cambios en los factores C y R de los escenarios planteados tuvieron el mismo efecto sobre la USLE que para otras zonas de baja precipitación, donde la pérdida de suelo y el escurrimiento aumentan más en relación al porcentaje de aumento de precipitaciones y su intensidad que por el cambio porcentual en la cobertura del suelo (Nearing et al., 2005). Estas relaciones quedaron en evidencia al comparar los escenarios de 2013 y 2018 (Figura 6) donde la cobertura vegetal inferior al promedio coincide con menor erosividad de las lluvias y genera menor tasa de pérdida de suelos en el escenario [1] que en el [2], este último con mayor cobertura, pero también mayor erosividad. La misma situación se corroboró en el año 2019 con la mayor tasa de erosión estimada y mayor cantidad de sedimentos en suspensión en dos de los tres cauces (Figura 7). Por otro lado, si bien mayores precipitaciones brindarían condiciones propicias para el crecimiento de la vegetación en estos sistemas áridos, la recuperación de la estructura del pastizal natural requiere de mayor esfuerzo cuanto mayor es su estado de deterioro (Ayesa et al., 1995; López et al., 2013).

Los cambios en la cobertura del pastizal, introducidos por el inadecuado manejo del pastoreo o causas ambientales como la caída de cenizas y sequías intensas y/o prolongadas, tienen efectos extendidos en el espacio y son convergentes en el aumento de la degradación del suelo en Patagonia (Chartier & Rostagno, 2006; Gaitán et al., 2009; Yu et al., 2022). En el área de estudio la caída generalizada de cenizas provocó la disminución del NDVI durante 2011, 2012 y 2013, con la deposición de material fácilmente erodable que contribuyó a la generación de eventos impactantes de erosión hídrica (Becker et al., 2012). Para prevenir o revertir el estado de deterioro de los pastizales naturales, podrían adoptarse medidas como la evaluación y planificación de uso (Siffredi et al., 2015; Andrade et al., 2015; SAyDS, 2018), el manejo controlado del pastoreo (Rodríguez & Jacobo, 2012) y la restauración por diseño hidrológico (Rango et al., 2006). Aunque la Constitución Nacional establece que el dominio y las decisiones de uso de los recursos naturales, incluidos el agua y el suelo, son potestad de las Provincias, la actual implementación de estrategias de restauración y conservación están mayormente restringidas por las realidades económicas de los gestores de los ecosistemas de pastizales naturales que en su mayoría son productores familiares (Thurow, 2000; Tilton et

al., 2021). Es claro el desacople entre la escala de toma de decisiones sobre el uso de la tierra y la escala de impacto que puede generar la ausencia de prácticas de manejo adecuadas.

La estimación de las tasas de pérdida de suelo anual en este estudio brinda un panorama de relaciones entre las variables involucradas y permite esquematizar el proceso, pero enmascara ciertos eventos de corta duración, concentrados en el espacio y de gran impacto como las tormentas ocurridas en 2012 (Agencia de Noticias Bariloche [ANB], 2012; Becker et al., 2012). En otros lugares del mundo se ha demostrado que ha habido cambios en la cantidad e intensidad de las precipitaciones (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023), con efectos en la generación de escurrimientos y erosión de suelo (Nearing et al., 2005). En la región de este estudio hay escasos antecedentes para afirmar las tendencias globales sobre un aumento en la intensidad de las precipitaciones (Aramayo et al., 2022). Mejorar el conocimiento de este parámetro en la región permitiría dimensionar cuál es el impacto que debe amortiguar la cuenca (Colombani et al., 2017).

Es interesante notar que las áreas más afectadas por tasas de pérdida de suelo severas también resultaron las mayores exportadoras de sedimentos en suspensión. Es decir que, aunque la relación entre ambos procesos no es directa, ambas aproximaciones aportan a la descripción del proceso con resultados en el mismo sentido. El modelo USLE y sus derivados (RUSLE, MUSLE, HUSLE) estiman la tasa de erosión y, si bien no pueden representar el transporte de sedimentos que alcanza los cauces en cuencas de superficie similar a la estudiada, varios autores han incorporado este flujo en modelos más complejos como AnnAGNPS (Bingner & Theurer, 2005) o SWAT (Arnold et al., 1998) que explican procesos erosivos y producción de sedimentos (De Vente et al., 2013). En las sub-cuencas de este estudio, la correlación entre la estimación de pérdida de suelo y la cantidad de sedimentos fue elevada a pesar de que en uno de los cauces hubo más sedimentos en el año de menor pérdida estimada (Figura 7). Esa mayor cantidad de material recolectado puede deberse al tránsito de hacienda aguas arriba de los colectores en la temporada de muestreo. Es sabido que la medición de sedimentos a la salida de la cuenca puede subestimar la tasa de erosión en la cuenca debido a la escasa cantidad de material que alcanza el tránsito en los cauces respecto del total producido debido a que operan procesos intermedios como la sedimentación y la erosión concentrada en surcos (Coronato & Del Valle, 1993). Sin embargo, los sedimentos pueden contribuir a interpretar los procesos erosivos que ocurren en una cuenca (De Vente et al., 2013; Ares et al., 2014), dado que la cantidad que llega a los canales depende de la conectividad de los flujos en los paisajes aguas arriba (López Vicente et al., 2015). En conjunto, los resultados de este trabajo ponen de manifiesto la existencia de áreas críticas y permiten establecer prioridades de acción o alcances de las decisiones para el cuidado de los recursos naturales de la región.

5. Conclusiones

La erosión de suelo por acción del agua es una problemática que afecta las tierras áridas de Patagonia. La susceptibilidad a la erosión hídrica y sus factores predisponentes a escala de cuenca se abordaron a partir de la reconstrucción del contexto actual y se plantearon escenarios posibles de acuerdo a modificaciones en la cobertura y la intervención sobre de los recursos naturales. En base a la estimación de la tasa de pérdida de suelo, contrastamos la predicción del modelo USLE con los sedimentos en suspensión colectados en tres arroyos de la cuenca, con resultados convergentes entre ambos.

La escala de cuenca se consideró adecuada para estudiar el problema complejo como la erosión hídrica. La extensión espacial del análisis fue posible gracias a la teledetección y el empleo de modelos como USLE, en entorno SIG con vínculo a softwares estadísticos como R. La combinación de estas herramientas permitió visibilizar, en el corto plazo, problemas complejos y de largo plazo, al tiempo que implicó resignar detalle espacial en algunos parámetros que necesitarían de mayor control de campo como por ejemplo la cobertura y las propiedades del suelo. A pesar de ello, los avances logrados en el conocimiento de la erosión hídrica en esta región nos acercan a la comprensión de procesos complejos en zonas de régimen de precipitación, geoformas y uso de la tierra similares. Este trabajo pretende brindar herramientas para evaluar el mejor aprovechamiento y planificación del uso de los recursos naturales y reducir la vulnerabilidad de las poblaciones locales en el contexto de cambio climático.

Financiación

Este trabajo fue posible gracias al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) por el financiamiento a través del programa de Becas Institucionales Res.N°1061/12, DN1006/2015 y al Proyecto "Aportes a la gestión de recursos hídricos en cuencas del Sistema agroalimentario argentino".

Agradecimientos

Al laboratorio de Agua y Suelo de INTA - EEA Bariloche, a Fernando Umaña y Fernando Raffo del laboratorio de Teledetección de INTA - EEA Bariloche por facilitar las tareas de búsqueda y procesamiento de imágenes satelitales.

Referencias

- Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). (2013). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*.
- Agencia de Noticias Bariloche (ANB). (2012, March 9). Tormenta provocó dos muertos y anegamientos. ANB. <https://www.anbariloche.com.ar/noticias/2012/03/09/26864-tormenta-provoco-dos-muertos-y-anegamientos>
- Alewel, C., Borelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International soil and water conservation research*, 7(3), 203-225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Alexakis, D. D., Hadjimitsis, D. G., & Agapiou, A. (2013). Integrated use of remote sensing, GIS and precipitation data for the assessment of soil erosion rate in the catchment area of “Yialias” in Cyprus. *Atmospheric Research*, 131, 108-124. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.02.013>
- Andrade, M. A., Suarez, D., Peri, P. L., Borrelli, N. P., Ormaechea, S. G., Ferrante, D., Rivera, E., & Sturzenbaum, M. V. (2015). *Desarrollo de un modelo de asignación variable de carga animal en Patagonia Sur*. Fundación CIPAV.
- Aramayo, V., Cremona, M. V., Fernández, R. J., & Nosetto, M. D. (2022). Características de las precipitaciones en zonas áridas de la Patagonia Norte, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 28. <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.180>
- Ares, M. G., Varni, M., y Chagas, C. (2014). Lluvia, escurrimiento y producción de sedimentos en una microcuenca agrícola bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*, 32(2), 259-270
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arnoldus, H. (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletin*, 34, 39-51.
- Ayesa, J., Bran, D., López, C., Cingolani, A., Clayton, S., & Sbriller, D. (1995). Evaluación del estado actual de la desertificación en la transecta Río Negro. INTA EEA-Bariloche. In *Lucha contra la desertificación en la Patagonia. Cooperación Técnica Argentina-Alemana. “Evaluación del estado actual de la desertificación en áreas representativas de la Patagonia: Informe final de la fase I”* (pp 153-178). INTA—GTZ.
- Bandieri, L. M., Fernández, R. J., & Bisigato, A. J. (2020). Risks of neglecting phenology when assessing climatic controls of primary production. *Ecosystems*, 23(1), 164-174. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00393-7>
- Becker, G., Bran, D., Cremona, V., & Acevedo, C. (2012). *Informe sobre la recorrida por sitios afectados por las precipitaciones torrenciales del 8 de marzo de 2012*. INTA EEA Bariloche. 8pp.
- Behrends Kraemer, F., Chagas, C. I., Marré, G., Palacín, E. A., & Santanatoglia, O. J. (2013). Desplazamiento de la ganadería por la agricultura en una cuenca de la pampa ondulada: efectos sobre el escurrimiento superficial y erosión hídrica. *Ciencia del suelo*, 31(1), 83-92.
- Bingner, R. L. & Theurer, F. D. (2005). *AnnAGNPS Technical Processes Documentation version 3.2*. USDA.
- Boggio, F., Cremona, M. V., Aramayo, M. V., Girardin, L., Raffo, F., Fariña, C. M., & Enriquez, A. S. (2019). *Guía para el curso: “Restauración y mejoramiento de mallines mediante obras de redistribución del agua de escurrimiento”*. Ediciones INTA.
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A.M., Gessesse, G.D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., Freppaz, M., Gentile, F., Gericke, A., Haregeweyn, N., Hu, B., Jeanneau, A., Kaffas, K., Kiani-Harchegani, M., Lizaga Villuendas, I., Li, C., Lombardo, L., López-Vicente, M., Esteban Lucas-Borja, E., Märker, M., Matthews, F., Miao, C., Mikoš, M., Modugno, S., Möller, M., Naipal, V., Nearing, M., Owusu, S., Panday, D., Patault, E., Valeriu Patriche, C., Poggio, L., Portes, R., Quijano, L., Reza Rahdari, M., Renima, M., Francesco Ricci, G., Rodrigo-Comino, J., Saia, S., Nazari Samani, A., Schillaci, C., Syrris, V., Soo Kim, H., Noses Spinola, D., Tarso Oliveira, P., Teng, H., Thapa, R., Vantas, K., Vieira, D., Yang, J.E., Yin, S., Antonio Zema, D., Zhao, G., & Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the total environment*, 780, 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>

- Brooks, K.N., Folliott, P.F., y Magner J.A. (2013). *Hydrology and the management of watersheds* (4th ed). John Wiley & Sons, Inc.
- Bruins, H. J., Evenari, M., & Nessler, U. (1986). Rainwater-harvesting agriculture for food production in arid zones: the challenge of the African famine. *Applied Geography*, 6(1), 13-32. [https://doi.org/10.1016/0143-6228\(86\)90026-3](https://doi.org/10.1016/0143-6228(86)90026-3)
- Buono, G., Oesterheld, M., Nakamatsu, V., & Paruelo, J. M. (2010). Spatial and temporal variation of primary production of Patagonian wet meadows. *Journal of Arid Environments*, 74(10), 1257-1261. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.05.026>
- Chartier, M. P. & Rostagno, C. M. (2006). Soil erosion thresholds and alternative states in northeastern Patagonian rangelands. *Rangeland Ecology & Management*, 59(6), 616-624. <https://doi.org/10.2111/06-009R.1>
- Chartier, M. P. & Rostagno, C. M. (2010). Evaluación del modelo WEPP para predecir la erosión hídrica en pastizales semiáridos del noreste de la Patagonia. *Ciencia del suelo*, 28(1), 91-103.
- Colombani, E., Behr, S., & Brandizi, L. (2017). Estimación de precipitaciones extremas a través de GSMAP y aplicación hidrológica a la crecida del arroyo Telsen, Chubut, Patagonia Argentina. *Meteorológica*, 42(1), 53-66
- Conrad, O. (2006). SAGA—program structure and current state of implementation. In J. Böhner, K.R., McCloy, & J. Strobl (Eds.), *SAGA—Analysis and Modelling Applications* (pp. 39-52). Göttinger Geographische Abhandlungen.
- Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD). (1994). Intergovernmental Negotiating Committee For a Convention to Combat Desertification, Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. U.N. Doc. A/AC.241/27, 33 I.L.M. 1328. United Nations, New York.
- Coronato, F. R., & Del Valle, H. F. (1993). Methodological comparison in the estimate of fluvial erosion in an arid closed basin of northeastern Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 24(3), 231-239. <https://doi.org/10.1006/jare.1993.1021>
- Cremona, M. V., Enriquez, A. S., Ayesa, J. A., Siffredi, G. L., Aramayo, M. V., Izquierdo, F. C., Velasco V., & Bran, D. E. (2019). Provincia de Río Negro. In R. Casas & F. Damiano (Eds.), *Manual de buenas prácticas de conservación del suelo y del agua en áreas de secano*. Tomo I. Fundación Ciencia, Educación y Cultura.
- Curcio, M., Irisarri, G., García Martínez, G., & Oesterheld, M. (2023). Trends of Aboveground Net Primary Productivity of Patagonian Meadows, the Omitted Ecosystem in Desertification Studies. *Remote Sensing*, 15(10), 2531. <https://doi.org/10.3390/rs15102531>
- Defossé, G. E. & Robberecht, R. (1987). Patagonia, range management at the end of the world. *Rangelands* 9(3), 106-109.
- De Vente, J. & Poesen, J. (2005). Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews*, 71(1-2), 95-125. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002>
- De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., Arabkhedri, M., & Boix-Fayos, C. (2013). Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? *Earth-Science Reviews*, 127, 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.014>
- D'odorico, P. & Porporato, A. (Eds). (2006). *Dryland Ecohydrology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4260-4>
- Duncan, J., Stow, D., Franklin, J., & Hope, A. (1993). Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 14(18), 3395-3416. <https://doi.org/10.1080/01431169308904454>
- Enriquez, A. S., Umaña, F., & Gaitán, J. J. (2020). Estimación y cartografía de las reservas de carbono edáfico en mallines de Patagonia Norte. *Actas XXVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*.
- Fabricante, I., Oesterheld, M., & Paruelo, J. M. (2009). Annual and seasonal variation of NDVI explained by current and previous precipitation across Northern Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 73(8), 745-753. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.02.006>

- Fernández, O. A., & Busso, C. A. (1999). Arid and semi-arid rangelands: two thirds of Argentina. In *Rala Report No. 200*, (pp. 41–60).
- Ferreiro, N., Gonzalez Polo, M., Satti, P.S., & Mazzarino, M. J. (2020). La erupción del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle (2011) y sus efectos sobre los suelos de Patagonia Norte. In P. Imbellone, & O.A. Barbosa (Eds.), *Suelos y vulcanismo, Argentina* (pp.293-308), Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo – AACCS. Libro digital.
- Flanagan, D. C. & Nearing, M. A. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. *Nserl Rep*, 10, 1-123.
- Gaitán, J. (2017). *Atributos estructurales y funcionales de los ecosistemas áridos y semiáridos de la Patagonia y su relación con factores abióticos y el uso antrópico* [Doctoral thesis, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio Digital Institucional de la Universidad de Buenos Aires. <http://ri.agro.uba.ar/greenstone3/library/collection/tesis/document/2017gaitanjuanjose>
- Gaitán, J.J., Bran, D., Oliva, G., Ciari, G., Nakamatsu, V., Salomone, J., Ferrante, D., Bueno, G., Massara, V., Humano, G., Celdrán, D., Opazo, W., & Maestre, F.T. (2013). Evaluating the performance of multiple remote sensing indices to predict the spatial variability of ecosystem structure and functioning in Patagonian steppes. *Ecological Indicators*, 34, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.05.007>
- Gaitán, J. J., López, C., Ayesa, J., Bran, D., & Umaña, F. (2004). Características y distribución espacial de los paisajes y los suelos del área Bariloche-Comallo. *Área de Recursos Naturales Relevamiento integrado. INTA EEA*.
- Gaitán, J. J., López, C. R., & Bran, D. E. (2009). Efectos del pastoreo sobre el suelo y la vegetación en la estepa patagónica. *Ciencia del suelo*, 27(2), 261-270.
- Gaitán, J. J., Navarro, M. F., Tenti Vuegen, L. M., Pizarro, M. J., & Carfagno, P. (2017). *Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina*. Ediciones INTA.
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Lana-Renault, N., Nadal-Romero, E., & Cerdà, A. (2017). Ongoing and emerging questions in water erosion studies. *Land Degradation & Development*, 28(1), 5-21. <https://doi.org/10.1002/ldr.2641>
- Godagnone, R. E. & Bran, D. E. (2009). *Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de Río Negro: geología, hidrología, geomorfología, suelos, clima, vegetación y fauna*. Ediciones INTA.
- Golluscio, R., Giraud, C., Borrelli, P., Montes, L., Siffredi, G., Cechi, G., Nakamatsu, V. & Escobar, J. (1998). Utilización de los recursos naturales en la Patagonia. In DHV Consultants & SCC Swedforest International AB (Eds.), *Ecosistemas desérticos Patagónicos* (pp. 1–82). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hijmans, R. J., van Etten, J., Cheng, J., Mattuzzi, M., Sumner, M., Greenberg, J.A., Perpiñán Lamigueiro, O., Bevan, A., Racine, E. B., & Shortridge, A. (2015). Package ‘raster’. *R package*, 734, 473.
- Horne, F. (2010). *Manejo hidrológico de mallines: aplicación al manejo sustentable del Mallín Genoa*. Educo, Universidad Nacional del Comahue.
- Hopmans, J. W. (2019). Soil physical properties, processes, and associated root-soil interactions. In P. D’Odorico, A. Porporato, & C. Runyan (Eds.), *Dryland ecohydrology* (pp 49-69). Springer.
- Husson, F., Josse, J., Le, S., Mazet, J., & Husson, M. F. (2016). Package ‘factominer’. *R package*, 96, 698.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos, INDEC. (2023). *Resultados provisionales del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022*. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Technical Summary. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35-144). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>
- Irisarri, J. G. N., Oesterheld, M., Paruelo, J. M., & Texeira, M. A. (2012). Patterns and controls of above-ground net primary production in meadows of Patagonia. A remote sensing approach. *Journal of Vegetation Science*, 23(1), 114-126. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01326.x>

- Jahantigh, M. & Pessarakli, M. (2009). Utilization of contour furrow and pitting techniques on desert rangelands: Evaluation of runoff, sediment, soil water content and vegetation cover. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7(2), 736-9.
- Lal, R. (2003). Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29, 437-450. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5(4), 212-222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>
- Le Houérou, H. N. (1996). Climate change, drought and desertification. *Journal of arid Environments*, 34(2), 133-185. <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0099>
- León, R. J., Bran, D., Collantes, M., Paruelo, J. M., & Soriano, A. (1998). Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología austral*, 8(2), 125-144.
- Li, Z. & Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163, 94-117. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004>
- López C.R., Gaitán J.J., Ayesa J.A., Siffredi G.L., & Bran D.E. (2005). Evaluación y clasificación de valles y mallines del Sudoeste de Río Negro. Área de Recursos Naturales Relevamiento integrado. INTA EEA Bariloche Comunicación Técnica 97. 1-27.
- López, D. R., Brizuela, M. A., Willems, P., Aguiar, M. R., Siffredi, G., & Bran, D. (2013). Linking ecosystem resistance, resilience, and stability in steppes of North Patagonia. *Ecological indicators*, 24, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.014>
- López-Vicente, M., Quijano Gaudes, L., Palazón Tabuenca, L., Gaspar Ferrer, L., & Navas Izquierdo, A. (2015). Assessment of soil redistribution at catchment scale by coupling a soil erosion model and a sediment connectivity index (Central Spanish Pre-Pyrenees). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(1), 127-147. <https://doi.org/10.18172/cig.2649>
- Massaferro, G. I., Arrigoni, G. I., Boschín, M. T., Fernández, M. M., Crivelli, E. A., & Cordero, J. A. (2012). Indicadores de tecnología y etnodinámica: el análisis de pigmentos en el paraje arqueológico Comallo Arriba, provincia de Río Negro, Argentina. *Boletín del Museo Chileno de Arte Precolombino*, 17(1), 117-127. <https://doi.org/10.4067/S0718-68942012000100007>
- McGarigal, K., Stafford, S., & Cushman, S. (2000). Ordination: principal components analysis. *Multivariate statistics for wildlife and ecology research*, 19-80. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1288-1_2
- Mitas, L., & Mitasova, H. (1999). Spatial interpolation. *Geographical information systems: principles, techniques, management and applications*, 1(2).
- Moore, I. D., Grayson, R. B., & Ladson, A. R. (1991). Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, 5(1), 3-30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Morgan, R. P. C. (2005). *Soil erosion and conservation* (3rd ed.). Blackwell Publ.
- Nearing, M. A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Le Bissonnaise, Y., Nichols, M.H., Nunes, J.P., Renschler, C.S., Souchère, V., & Van Oost, K. (2005). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61(2-3), 131-154. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.007>
- Oliva, G., Dos Santos, E., Sofía, O., Umaña, F., Massara, V., García Martínez, G., Caruso, C., Cariac, G., Echevarría, D., Fantozzi, A., Butti, L., Bran, D., Gaitán, J., Ferrante, D., Paredes, P., Domínguez, E., & Maestre, F. T. (2020). The MARAS dataset, vegetation and soil characteristics of dryland rangelands across Patagonia. *Scientific Data*, 7, 327. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00658-0>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). *Estado mundial del recurso suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*.
- Orúe, M. E., Láttera, P., & Cabria, F. (2007). Expansión de la frontera agrícola en Argentina y erosión hídrica: mapas de riesgo utilizando el modelo USLE con apoyo de SIG. *Teledetección. Hacia un Mejor Entendimiento de la Dinámica Global*, 185-192.

- Palacio, R. G., Bisigato, A. J., & Bouza, P. J. (2014). Soil erosion in three grazed plant communities in northeastern Patagonia. *Land Degradation & Development*, 25(6), 594-603. <https://doi.org/10.1002/ldr.2289>
- Paruelo, J. M. & Golluscio, R. A. (1994). Range assessment using remote sensing in Northwest Patagonia (Argentina). *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 47(6), 498-502. <https://doi.org/10.2307/4003005>
- Paruelo, J. M., Golluscio, R. A., Guerschman, J. P., Cesa, A., Jouve, V. V., & Garbulsky, M. F. (2004). Regional scale relationships between ecosystem structure and functioning: the case of the Patagonian steppes. *Global Ecology and Biogeography*, 13(5), 385-395. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2004.00118.x>
- Phillips, J.M., Russell, M.A., & Walling, D.E. (2000). Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. *Hydrological processes*, 14(14), 2589-2602. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2589::AID-HYP94>3.0.CO;2-D)
- Právělie, R. (2016). Drylands extent and environmental issues. A global approach. *Earth-Science Reviews*, 161, 259-278. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.003>
- QGIS.org. (2021). *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- Rango, A., Tartowski, S. L., Laliberte, A., Wainwright, J., & Parsons, A. (2006). Islands of hydrologically enhanced biotic productivity in natural and managed arid ecosystems. *Journal of arid environments*, 65(2), 235-252. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.09.002>
- Renard, K. G. & Foster, G. R. (1985). Managing rangeland soil resources: the Universal Soil Loss Equation. *Rangelands Archives*, 7(3), 118-122.
- Rienzi, E. A., Maggi, A. E., Navone, S. M., & Movia, C. P. (1999). Factores que regulan la erosión hídrica en la cuenca del río Santa María, provincia de Catamarca, Argentina. *Terra Latinoamericana*, 17(1), 45-50.
- Rodríguez, A. & Jacobo, E. (2012). *Pastoreo controlado. Una herramienta para el manejo de los pastizales naturales en sistemas ganaderos extensivos: buenas prácticas para una ganadería sustentable de pastizal*. In P. Prelliasco, G. Roitman, & F. Miñarro (Col.), *Kit de extensión para las pampas y campos (1st ed.)*. Fundación Vida Silvestre Argentina, Aves argentinas/AOP. FAUBA. http://awsassets.wffar.panda.org/downloads/cartilla_pastoreo_controlado_kit_de_extension_para_las_pampas_y_campos.pdf
- Rodriguez Vagaría, A. M. & Gaspari F. J. (2015). Estimación de la admisibilidad de pérdidas de suelo por erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napaleofú, provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana*, 56. <http://epublica.saber.ula.ve/index.php/regeoven/article/view/11492>
- Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS). (2018). *Región Patagonia norte: La Pampa, Neuquén y Río Negro Guía de prácticas de manejo sustentable de tierras y conservación de suelos*. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/patagonia_norte_guias_buenas_practicas_.pdf
- Senay, G. B. & Elliott, R. L. (2002). Capability of AVHRR data in discriminating rangeland cover mixtures. *International Journal of Remote Sensing*, 23(2), 299-312. <https://doi.org/10.1080/01431160010014855>
- Siffredi, G. L., Boggio, F., Giorgetti, H., Ayesa, J., Kropfl, A., & Alvarez, J. M. (2015). *Guía para la evaluación de Pastizales*. Ediciones INTA.
- Spinoni, J., Vogt, J., Naumann, G., Carrao, H., & Barbosa, P. (2015). Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen–Geiger classification and FAO aridity index. *International Journal of Climatology*, 35(9), 2210-2222. <https://doi.org/10.1002/joc.4124>
- Thurow, T. L. (2000). Hydrologic effects on rangeland degradation and restoration processes. In O. Arnalds & S. Archer (Eds.), *Rangeland desertification* (pp. 53-66). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9602-2_5
- Thurow, T.L. (1991). Hydrology and erosion. In R.K. Heitschmidt & J.W. Stuth (Eds.), *Grazing management: An ecological perspective* (pp. 141–159). Timber Press.
- Tittonell, P. A., Hara, S. M., Alvarez, V. E., Aramayo, M. V., Bruzzone, O. A., Easdale, M. H., Enriquez, A.S., Laborda, L., Trinco, F.D., Villagra, S.E., & El Mujtar, V. A. (2021). Ecosystem services and disservices associated with pastoral systems from Patagonia, Argentina—A review. *Cahiers Agricultures*, 30, 43. <https://doi.org/10.1051/cagri/2021029>
- Van der Knijff, J. M. F., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (1999). *Soil erosion risk assessment in Italy*. European Soil Bureau, Joint Research Centre, European Commission, Space Applications Institute.

- Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., & Montanarella, L. (2000). *Soil erosion risk: assessment in Europe*. European Soil Bureau, Joint Research Centre, European Commission, Space Applications Institute.
- Vich, A. I. & Mariani, A. (2010). Evaluación y predicción de la erosión hídrica en regiones áridas de relieve acentuado del centro-oeste de Argentina. *Multequina*, 19, 7-20.
- Villagra, E.S., Pelliza, A., Willems, P., Siffredi, G., & Bonvissuto, G. (2013). What do domestic livestock eat in northern Patagonian rangelands? *Animal Production Science*, 5(4), 360-367. <https://doi.org/10.1071/AN11283>
- Walling, D.E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65, 209-237. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90217-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90217-2)
- Walling, D. E. & Collins, A. L. (2008). The catchment sediment budget as a management tool. *Environmental science & policy*, 11(2), 136-143. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.10.004>
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation (No. 282)*. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
- Wischmeier, W. H. & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning (N° 537)*. Department of Agriculture, Science and Education Administration.
- Xiong, M., Sun, R., & Chen, L. (2019). Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43(3), 391-409. <https://doi.org/10.1016/j.pge.2019.03.004>
- Yang, D., Kanae, S., Oki, T., Koike, T., & Musiak, K. (2003). Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. *Hydrological processes*, 17(14), 2913-2928. <https://doi.org/10.1002/hyp.1441>
- Yohannes, H., Soromessa, T., Argaw, M., & Dewan, A. (2021). Impact of landscape pattern changes on hydrological ecosystem services in the Beressa watershed of the Blue Nile Basin in Ethiopia. *The Science of the Total Environment*, 793, 148559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148559>
- Yu, Y., Zhu, R., Ma, D., Liu, D., Liu, Y., Gao, Z., Yin, M., Bandala, E. R., & Rodrigo-Comino, J. (2022). Multiple surface runoff and soil loss responses by sandstone morphologies to land-use and precipitation regimes changes in the Loess Plateau, China. *Catena*, 217, 106477. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106477>

Incorporación de factores socioeconómicos al análisis de vulnerabilidad del riesgo por inundación en vías usando un modelo geoespacial

Incorporating socio-economic factors into roadway flood risk vulnerability analysis using geo spatial model

AUTORÍA

Alejandro Parra Saad 
Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle,
Bogotá. Colombia.

Mayerling Sanabria Buitrago 

Facultad de Ingeniería, Universidad de La Salle,
Bogotá. Colombia.

Ricardo Sanabria 

Grupo de Energía de Bogotá. Colombia.

Karol Natalia Piñeros Dueñas 

Universidad de La Salle, Bogotá. Colombia.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25788>

CITACIÓN

Parra Saad, A., Sanabria Buitrago, M., Sanabria, R., & Piñeros Dueñas, K. N. (2024). Incorporación de factores socioeconómicos al análisis de vulnerabilidad del riesgo por inundación en vías usando un modelo geoespacial. *Investigaciones Geográficas*, (81), 201-223. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25788>

CORRESPONDENCIA

Alejandro Parra Saad (alparra@unisalle.edu.co)

HISTORIA

Recibido: 12 septiembre 2023
Aceptado: 29 diciembre 2023
Publicado: 26 enero 2024

TÉRMINOS

© Alejandro Parra Saad, Mayerling Sanabria Buitrago, Ricardo Sanabria y Karol Natalia Piñeros Dueñas

 Este trabajo se publica bajo una licencia [Creative Commons de Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Resumen

Colombia por sus características geofísicas y ubicación en la zona tropical es propensa a fenómenos de inundación, que sumados a la vulnerabilidad de la red vial y la presencia permanente de población contiguamente a la vía, acrecientan la fragilidad social y económica en los corredores viales. Esta situación se evidencia cuando se presentan colapsos de transitabilidad por inundación, pues el país moviliza la mayoría de sus mercancías por tierra. El conocimiento y sistematización de las condiciones, sociales y económicas en el trazado vial nacional, y la incorporación de estos datos a un modelo espacial replicable, podría ser una alternativa para tomar decisiones orientadas a prevenir el riesgo. En este artículo se presenta el diseño conceptual y metodológico de una propuesta para involucrar los factores socio económicos requeridos en una evaluación del riesgo por inundación en vías utilizando herramientas de análisis espacial en el tramo piloto Ruta 6008 Chiquinquirá-Sáchica (36 km). Se cuantifica un índice global de aspectos socioeconómicos que se relaciona con la vulnerabilidad en tres niveles: local, zonal y regional. Como resultado principal se encuentra que el corredor vial presenta un nivel de vulnerabilidad media-alta, debido a los aspectos de exposición y fragilidad en las condiciones de vivienda y medios de vida.

Palabras clave: vulnerabilidad socioeconómica; inundación; corredor vial; cartografía; análisis geoespacial; sistema de información geográfica.

Abstract

Due to its geophysical characteristics and location in a tropical zone, Colombia is prone to flooding phenomena, which, in addition to the vulnerability of the road network and the permanent presence of the population residing close to the roads, increase the social and economic fragility of the road corridors. This situation is evident when traffic collapses due to flooding, as the country mobilizes most of its goods by land. The knowledge and systematization of the social and economic conditions of the national road layout, and the incorporation of these data into a replicable spatial model, could be an alternative for making decisions aimed at risk prevention. This paper presents the conceptual and methodological design of a proposal of the socioeconomic factors required in a road flood risk assessment using spatial analysis tools in the pilot section Route 6008 Chiquinquirá-Sáchica (36 km). A global

index of socioeconomic aspects related to vulnerability is quantified at three levels: local, zonal and regional. The main result is that the road corridor presents a medium-high level of vulnerability, due to the aspects of exposure and fragility in housing and livelihood conditions.

Keywords: socioeconomic vulnerability; flooding; road corridor; mapping; geospatial analysis; geographic information system.

1. Introducción

Las inundaciones en los corredores viales son fenómenos de riesgo de cierta frecuencia en el país dado la intensidad actual de los periodos de lluvia por efectos del cambio climático global y la transformación de coberturas por usos más intensivos (Lozano-Povis et al., 2021). La afectación de la infraestructura vial por dicho fenómeno altera sustancialmente la conectividad de las poblaciones, el desarrollo socioeconómico, el bienestar y la vida misma de las personas. La diversidad de factores que intervienen en la manifestación de estos fenómenos, así como las posibles consecuencias que puedan ocasionar, requieren de una especial atención no solo de las autoridades competentes en la gestión del riesgo, sino también de los demás actores vinculados a los temas de planificación territorial.

Según Sedano-Cruz et al. (2013) “La variabilidad climática está generando frecuentes anomalías en la precipitación. En el ámbito mundial el 95% de los desastres socio naturales son de origen hídrico” (p. 48), y en Colombia el panorama no es distinto, pues la presencia de llanuras bajas y valles aluviales, sumado a los escenarios de precipitación intensa facilitan la ocurrencia de inundaciones. La pérdida de transitabilidad por un evento de inundación genera no solamente efectos sobre la economía del país sino también altera directamente las dinámicas propias de cada región. Dado lo anterior, el territorio colombiano está considerablemente expuesto a las alteraciones en los aspectos sociales y económicos que puedan verse perjudicados por eventos como derrumbes, deslizamientos e inundaciones en la red vial del país. Por tanto, se debe avanzar en el conocimiento de la vulnerabilidad en el marco de la gestión del riesgo de desastres, por lo que el presente artículo propone la vinculación de factores sociales y económicos al análisis de dicha vulnerabilidad, teniendo en cuenta la importante presencia de asentamientos en los corredores viales y la conectividad que las vías representan para el desarrollo de actividades económicas y sociales del país.

Entre los aspectos más relevantes de la Política Pública de Gestión del Riesgo (Ley 1523 de 2012) están: (i) *la gestión del conocimiento* (identificación de escenarios, análisis y evaluación del riesgo), (ii) *la reducción* (intervención correctiva y prospectiva, y protección financiera) y (iii) *el manejo* (respuesta, rehabilitación y recuperación); por esta razón, es necesario el desarrollo y la implementación de variables/indicadores sociales y económicos que contribuyan a la valoración cualitativa del riesgo en las vías como una herramienta técnica para la gestión del riesgo de desastres acorde con la referida Política Pública.

Teniendo en cuenta que los aspectos centrales en la determinación del riesgo son la amenaza y la vulnerabilidad; y que en ésta última se debe contemplar distintas dimensiones como la física, la económica, la social, la educativa, la cultural e ideológica, la natural (ambiental y ecológica), la científica y tecnológica, y hasta la política e institucional; éste trabajo vincula nuevas variables de análisis para calcular la vulnerabilidad social y económica dentro de un modelo de vulnerabilidad del riesgo por inundación bajo herramientas geoespaciales en un ambiente SIG.

Una vez identificadas las variables socioeconómicas más apropiadas en la dinámica territorial de los corredores viales colombianos, se diseñó un modelo conceptual de vulnerabilidad socioeconómica que fue transferido a un *model builder* en ArcGIS PRO ®. Ésta sistematización aporta a la aproximación del conocimiento del riesgo por inundación bajo el planteamiento de una metodología que vincula el análisis geoespacial multicriterio.

1.1. Revisión de literatura

El Riesgo puede entenderse como la probabilidad de que una amenaza se materialice o convierta en un desastre, metodológicamente es el resultado de multiplicar la Amenaza por la Vulnerabilidad, por lo que el riesgo puede asociarse con las posibles pérdidas (directas y/o indirectas) que pueden generarse, en otras palabras, sirve como una medida para establecer la magnitud de los daños por la ocurrencia de eventos que amenazan distintos aspectos, sistemas y/o comunidades. De acuerdo con Ayala y Olcina (2002), el riesgo se define como:

$$R = f(A_i, V_e) \quad \text{ecuación (1)}$$

Dónde R es el Riesgo, A_i es la amenaza de acuerdo con su intensidad y V_e es la vulnerabilidad de acuerdo con la exposición. De otra parte, la Amenaza se define en la Ley 1523 de 2012 como el

Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales dichas amenazas pueden ser de origen natural, socionatural y/o antrópica (Wilches, 1989).

En el mismo marco normativo de la Ley 1523 de 2012 la vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

Esto es especialmente relevante dado que en la ecuación 1, la vulnerabilidad tiene un papel esencial puesto que su naturaleza es intrínseca a las personas o sociedades, es decir, a la propia presencia humana, presencia que es cada vez mayor en el territorio, lo que supone la existencia del riesgo.

No obstante, distintos referentes han presentado redefiniciones del término vulnerabilidad entre las cuales se encuentra la definición propuesta por Wilches (1993), indicando que la vulnerabilidad puede entenderse como “La incapacidad de una comunidad para absorber mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su inflexibilidad o incapacidad para adaptarse a ese cambio” (p. 17); la incapacidad es el resultado de la combinación de aspectos internos y externos en una comunidad y el medio ambiente en el que conviven, que lleva a dicha comunidad a un estado de completa imposibilidad para responder ante los cambios repentinos que desencadenan desastres. De otro lado, la vulnerabilidad también hace referencia a la capacidad disminuida de un individuo o población para anticiparse, hacer frente y resistir a los efectos de un suceso natural o antrópico, y la dificultad y lentitud para recuperarse.

De otro lado, el Banco Mundial (2003) refiere que la vulnerabilidad puede ser definida como una situación latente caracterizada por la convergencia de circunstancias que aumentan la probabilidad de las personas y hogares de sufrir contingencias que disminuyan dramáticamente su bienestar. Es un concepto multidimensional que busca identificar factores que refuerzan la reproducción de procesos que deterioran el nivel de vida de los hogares e individuos. La vulnerabilidad tiene su origen en la interacción de factores internos y externos a los hogares, que configuran su situación en un momento y espacio determinado. Los factores internos son los recursos de los que disponen los individuos y hogares, y las diversas estrategias de acción que estos les permiten desplegar para hacer frente a factores externos (shocks de origen natural o social); a mayor cantidad, diversidad y calidad de los recursos que pueden movilizar los individuos y hogares para responder a modificaciones del entorno, menor el nivel de vulnerabilidad. En este sentido, el grado de vulnerabilidad de un individuo u hogar depende de los shocks que estos enfrentan y de su resiliencia a los mismos para evitar que éstos profundicen o activen procesos de empobrecimiento (Banco Mundial, 2003).

La conceptualización del término vulnerabilidad involucra una diversidad de aspectos y dimensiones que van más allá del efecto que pueden ejercer factores internos como lo ambiental, lo económico y lo político, y factores externos como la infraestructura conforme a lo sugerido por Silva-Burgos y Barriga (2009), además estos autores plantean conceptualmente la vulnerabilidad “como una situación en que se ponen en riesgo los instrumentos productores de certezas, entendiendo estos productores como el acceso a la educación, al empleo, la integración social y la calidad de vida entre otros” (Silva-Burgos & Barriga, 2009, p. 60), es decir, que aproximan la vulnerabilidad a la pérdida de bienestar. En correspondencia con lo anterior, para Moser (1998) la vulnerabilidad es la inseguridad (y sensibilidad) acerca de la percepción del bienestar que tienen las personas, los hogares y/o las comunidades en situaciones de cambio. Contextualizando lo anterior en el escenario de los espacios físicos que interactúan con comunidades, como es el caso de los corredores viales, es claro que cualquier cambio o disrupción en una infraestructura vial, potencialmente puede afectar el grado de bienestar, lo cual está estrechamente relacionado con la vulnerabilidad y específicamente con la vulnerabilidad social y la vulnerabilidad económica.

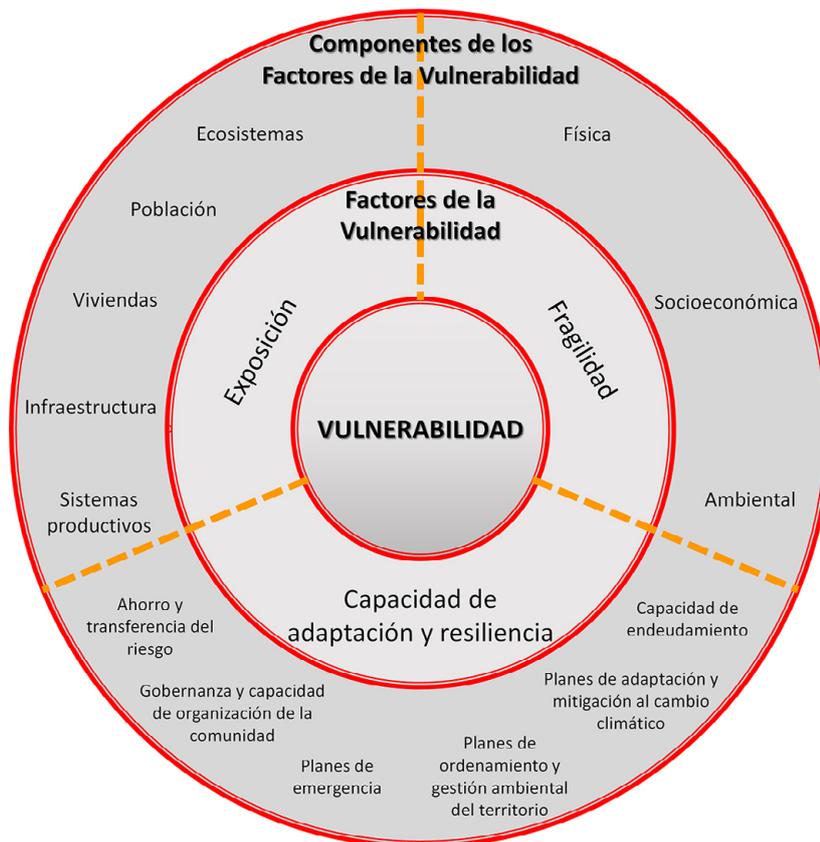
Según Silva-Burgos y Barriga (2009) la vulnerabilidad social se refiere a “una situación en que la incertidumbre rompe con nuestras certezas y premoniciones de seguridad, lo cual genera una serie de quiebres, abarcando niveles micro y macrosociales” (Silva-Burgos & Barriga, 2009, p. 59). En el contexto de los proyectos viales,

la vulnerabilidad social, se enmarca en el grado de afectación que puede experimentar una comunidad en sus condiciones y medios de vida asociados con el espacio físico llamado vía, asimismo, este espacio físico provee o produce certezas sociales como la comunicación continua, la movilidad de materias primas y alimentos, etc., que dan la sensación de seguridad, por lo que cualquier cambio o interrupción desprovee e inhabilita a la comunidad o usuarios de una vía.

Otro aspecto conceptualmente importante y relacionado con lo anterior, es la incapacidad para enfrentar la exposición a un determinado riesgo y una inhabilidad para adaptarse activamente ante tal situación, en este punto la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) define la vulnerabilidad social como la sumatoria de tres aspectos: exposición a riesgos, incapacidad para enfrentarlos e inhabilidad (CEPAL, 2002). En síntesis, la vulnerabilidad social es producto de los procesos sociales que generan una exposición desigual a los riesgos y situaciones de crisis y estrés, donde determinados individuos y grupos son más propensos a los riesgos y a las desigualdades, las cuales se pueden reproducir (Sánchez-Gonzalez & Egea-Jiménez, 2011).

De otra parte, Vera y Albarracín (2015) aportan componentes adicionales en el marco de la vulnerabilidad al referir que ... “La vulnerabilidad es función de tres componentes principales: la exposición ante amenazas naturales, socio-naturales o antrópicas; la sensibilidad o fragilidad de los elementos expuestos y la capacidad de adaptación o recuperación” (p. 111), la siguiente figura expone los tres componentes y factores de la vulnerabilidad.

Figura 1. Factores y componentes de la vulnerabilidad



Fuente: Vera & Albarracín 2015, p. 112. Elaboración propia

Por otra parte, el concepto de vulnerabilidad económica ha sido menos tratado en la literatura, aunque existen varias definiciones e interpretaciones (Saldaña-Zorrilla, 2006). Normalmente se ha asociado la vulnerabilidad económica a los aspectos macroeconómicos, sin embargo, existen visiones que reducen el espectro a análisis de la vulnerabilidad económica a los posibles grados de daños a los que se enfrenta una persona o comunidad. Adicionalmente, existen interpretaciones muy sesgadas hacia los impulsores o determinantes de la vulnerabilidad económica en el contexto del desarrollo internacional, cuyo rasgo central es considerar la vulnerabilidad económica como una situación en la que los países menos adelantados se encuentran en una relación de dominio y dependencia frente a los países desarrollados, es decir, en condiciones de asimetría económica.

En línea con lo anterior la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD) define la vulnerabilidad económica como una posición estructuralmente más expuesta de unos países menos avanzados con relación a otros con alto nivel de desarrollo, otros aspectos de nivel macro en el que se asocia la vulnerabilidad económica es el de las inconsistencias en el desempeño de las políticas macroeconómicas (Saldaña, 2006), no obstante, estos enfoques no sólo no abordan todos los aspectos estructurales sino que además desconocen los aspectos micro (a nivel de individuos y comunidades). Esta visión macro ha sido corregida desde otros referentes teóricos como el de la “Gestión del Riesgo” en el que se conceptúa la vulnerabilidad económica de otra forma:

vulnerabilidad económica asociada a la relación indirecta entre los ingresos en los niveles nacional, regional, local o poblacional y el impacto de los fenómenos físicos extremos, es decir que se asocia con la pobreza y a la incapacidad de generar más recursos económicos o medios de sustento por la situación social particular o la baja capacidad de restablecer los mecanismos para generar ingresos ante la ocurrencia de una amenaza natural; vulnerabilidad de los sectores más deprimidos, desempleo, insuficiencia de ingresos, inestabilidad laboral y dificultad de acceso a los servicios de educación, salud, ocio, entre otros (Wilches, 1989).

Este acercamiento a la vulnerabilidad social y económica permite evidenciar la complejidad y diversas dimensiones de la vulnerabilidad, por lo que su abordaje metodológico se realiza a partir de la definición de categorías que delimitan condiciones o aspectos a analizar, este matiz permite puntualizar en la interacción entre los aspectos sociales y económicos de las personas (y comunidades) con los corredores viales, a partir de la compilación de información que conduce a caracterizar las condiciones y calidad de vida de los habitantes en un territorio, así como las formas de organización productiva y los medios de sustento. Conceptualmente en este trabajo se delimita los “aspectos sociales” como el conjunto de características que reflejan la forma de organización de las comunidades, mientras que el “aspecto económico” se entiende como las características que reflejan las formas de organización de la producción y/o los medios de generación de ingresos en una comunidad o zona. Además, con el levantamiento de información de estos aspectos se logra realizar mediciones y relaciones entre variables que permite la construcción de indicadores, los cuales permiten describir las características y comportamientos de interés (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2007) y permiten identificar debilidades relativas o condiciones de deterioro que agravarían los efectos directos causados por fenómenos peligrosos (Cannon, 2003).

En cuanto a la utilización de variables sociales y económicas para medir la vulnerabilidad se encuentran referencias recientes que emplean un set de variables amplio para validar modelos de vulnerabilidad social que sirven de base para validar modelos de vulnerabilidad social en corredores viales, Rufat y otros profundizan en este punto realizando un estudio acerca de qué tan válidos son los modelos de vulnerabilidad social (Rufat et al., 2019). Los autores analizan varios modelos, los constructos empleados para la representación de la categoría “Social” y las variables utilizadas para captar la información, entre las categorías identificadas se encuentran criterios asociados a las personas como la edad, el género, la raza, el ingreso, nivel educativo, dominio de otro idioma, estado civil, condición de desempleo y pobreza entre otros, además se encuentran criterios asociados a las condiciones de habitabilidad e infraestructura de las viviendas como tipo de vivienda, tipo de propiedad de la vivienda, porcentaje de población que vive en alojamientos grupales, vivienda en estructuras multiunidades entre otras, variables muy similares a las utilizadas en la propuesta metodológica que se presenta en este trabajo y que fueron objeto de validación empírica y de constructo como lo sugieren Rufat et al. (2019).

De otro lado, Tascón-González et al. (2020), proponen una metodología para calcular y analizar la vulnerabilidad social frente a las inundaciones, apoyándose metodológicamente en la integración y ponderación de indicadores de exposición y resiliencia, además, la selección de indicadores se basa en el método del proceso analítico jerárquico (AHP). Los autores construyen un índice de vulnerabilidad a partir de la agregación de categorías de vulnerabilidad por exposición y por resiliencia incluyendo variables sociales como edad, género, forasteros, turistas, densidad poblacional, nivel de educación, acceso a formas de telecomunicación entre otras, además de variables como equipamientos de comunicación, accesibilidad a vías, población de voluntariado. Estas variables son cuantificadas, posteriormente normalizadas y utilizadas para la estimación de un índice de vulnerabilidad social por inundación en Ponferrada, España.

Otros autores que también se apoyan metodológicamente en la identificación de aspectos sociales para la construcción de un índice de vulnerabilidad social por inundaciones son Koks et al. (2019) y Tate et al. (2021). Los primeros realizan un análisis de riesgos en la infraestructura vial y ferroviaria, a partir del análisis

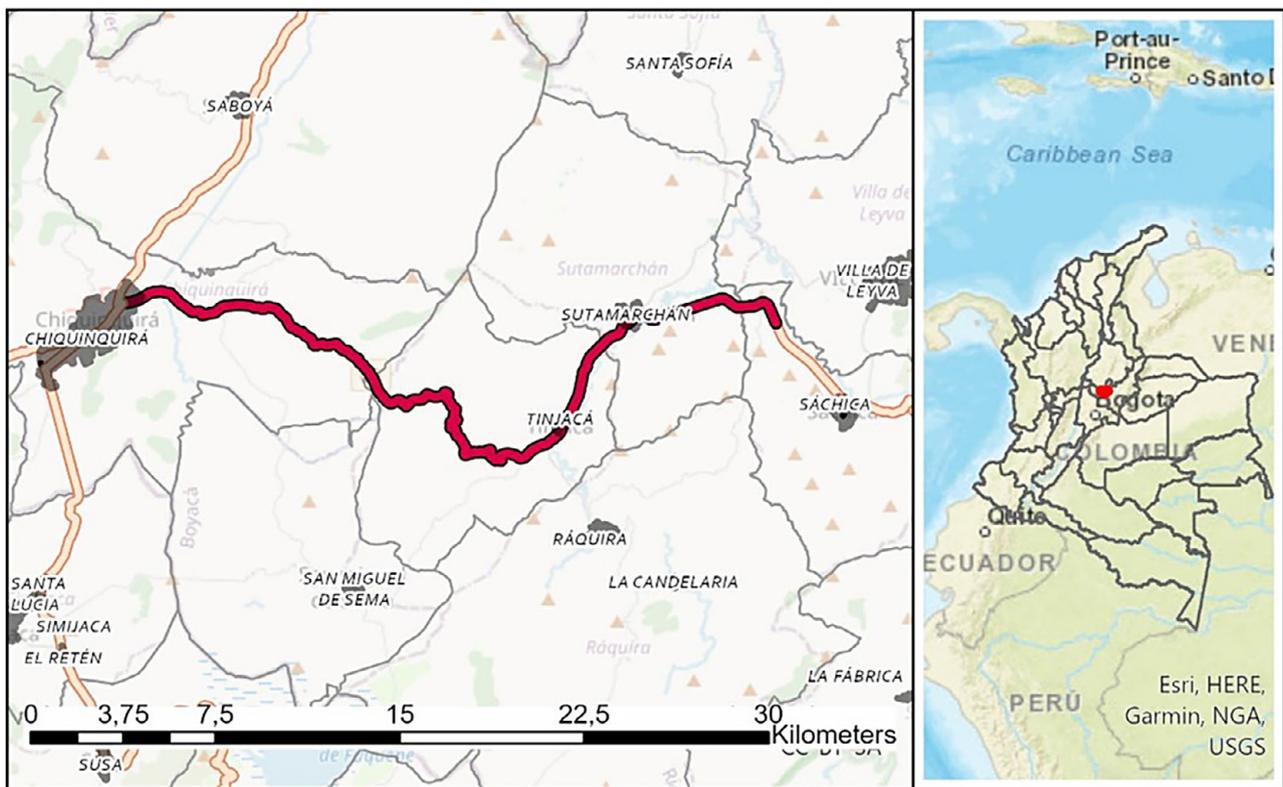
de la exposición global a peligros naturales, realizando el estudio a escala mundial, desagregando los países según el nivel de ingreso, mientras que los segundos realizan un estudio sobre la vulnerabilidad social y la exposición a inundaciones en Estados Unidos. Los estudios tienen en común la construcción de un índice de exposición por inundación y la utilización de herramientas de georreferenciación para establecer las zonas con mayor vulnerabilidad. Este procedimiento es similar al utilizado tanto en el procedimiento metodológico como en las categorías conceptuales a la adecuación de variables e indicadores, como la utilización de categorías como población migrante (Rufat et al., 2015); Tascón-González et al., 2020), características socioeconómicas (Koks et al., 2019; Tate et al., 2021) y condiciones de la infraestructura de vivienda (Rufat et al., 2019), validando los métodos, categorías y variables empleadas en esta propuesta metodológica, la cual se describe en el siguiente apartado.

2. Metodología

2.1. Definición del área de estudio

Teniendo en cuenta los estudios de riesgo identificados por el Instituto Nacional de Vías de Colombia se definieron áreas de interés por regiones para implementar la metodología de inclusión de indicadores sociales y económicos en la cuantificación de la vulnerabilidad del riesgo por inundación. Es así que se establece como estudio de caso la Dirección Territorial (DT) Boyacá: Ruta 6008 Transversal Puerto Boyacá-Monterrey-Sáchica (36 km).

Figura 2. Corredores viales del área de estudio – Ruta 6008 transversal Puerto Boyacá-Monterrey-Sáchica



Elaboración propia

El tramo de la ruta 6008, parte del casco urbano de Chiquinquirá, hasta el municipio de Sáchica, atravesando los municipios de Tinjacá y Sutamarchán, dentro del departamento de Boyacá. Es una zona con topografía suave y con pendientes promedio de 3,7 %, salvo un tramo de 8 km en la zona intermedia del transecto donde las pendientes alcanzan valores de hasta del 11%. En general, es una zona relativamente estable desde el punto de vista tectónico, pues no se evidencian fallas geológicas a lo largo del corredor solamente un plegamiento Anticlinal de Tinjacá-Oiba, lo que indica que las rocas aflorantes expuestas en el núcleo son rocas antiguas con buenos niveles de litificación. En la zona de Chiquinquirá se encuentran depósitos aluviales al norte y shales y calizas al sur que se extienden hasta Sáchica, donde además se pueden encontrar depósitos aluviales.

La alta densidad de quebradas y ríos del sector hacen que a lo largo del tramo de estudio se presenten zonas de intersección con los cauces, lo que establece escenarios de posible amenaza por avenidas torrenciales, socavación e inundación (especialmente en periodos hidrológicamente húmedos como cuando se presenta el fenómeno de *La Niña* en el país). Esta información fue confirmada consultando las bases de datos de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres - UNGRD que clasifica este sector como una zona de amenaza media-alta por inundación.

2.2. Levantamiento de la información

Para el análisis de la vulnerabilidad socioeconómica sobre los corredores viales se requiere información detallada de la red vial. Por tanto, se diseñó un formulario en la aplicación Survey 123 de la plataforma ArcGIS online de ESRI® que recopila y georreferencia las variables socioeconómicas requeridas en el análisis de la vulnerabilidad del riesgo por inundación en vías propuesto en este artículo (Figura 2).

Al terminar de diligenciar el formulario, la aplicación Survey 123 genera la geolocalización del dato, permitiendo crear una capa de información tipo punto que reúne las preguntas del formulario en variables espacializadas para el componente social y económico, de manera que se logra una verificación y registro de datos en campo a escala detallada, con el fin de optimizar los geo-procesos para la valoración de la vulnerabilidad.

Figura 3. Formulario en línea diseñado por el grupo de trabajo

COMPONENTE SOCIAL Y ECONÓMICO

Componente social y económico

CONDICIONES DE LA VIVIENDA

La(s) vivienda(s) se encuentra(n) agrupadas o separadas

Hace referencia a la concentración de viviendas en la zona, identificando si hay o no asentamiento, de acuerdo con el número de viviendas presentes.

1 - 3 viviendas 4 - 6 viviendas Más de 6 viviendas

Se evidencia infiltración de agua (potable, lluvia o residual), por fallas o inexistencia de sistemas de recolección.

Se refiere a la existencia o no de infiltración de agua(s) provenientes de la vivienda, bien sea agua lluvia, residual o potable, debido a la inexistencia o condiciones deficientes de un sistema de recolección de agua.

Si existe No identificado

CONDICIONES Y MEDIO DE VIDA

En la zona se reconoce la presencia (permanente o transitoria) de población migrante

Hace referencia al hecho de que se pueda identificar fácilmente algún tipo de susceptibilidad social entre la comunidad de la zona de estudio, principalmente a la presencia de población inmigrante bien sea de forma permanente o temporal; también a la posibilidad de identificar edades vulnerables como niños y adultos mayores y personas con condición de discapacidad o enfermedades, entre otras condiciones que considere susceptibles.

Si existe

CONDICIONES ECONÓMICAS

Existe actividad económica en la franja de retiro

Hace referencia a si existe o no actividad económica en la franja de retiro y de qué tipo es ésta: agrícola, ganadera, minera, comercial, industrial u otra como, por ejemplo: centros de acopio, bodegas, locales comerciales, entre otros.

Si existe No existe

Ubicación*

Ubicación Puntos de interés

Buscar dirección o lugar

Lat: 1.664795 Long: 11.562595

Untitled question 143

Enviar

Elaboración propia

Cada tramo de vía presenta condiciones particulares, por tanto, el propósito de este instrumento de captura es compilar el conocimiento de los administradores viales en sus respectivos recorridos, y obtener a través de un formulario en línea y en tiempo real, la observación directa de las características tanto de las condiciones económicas como sociales. A través de un punto georreferenciado, se almacenan los descriptores que han sido analizados, revisados y evaluados por un grupo de trabajo multidisciplinario en el tema del análisis de riesgo por inundación, este archivo de puntos permite ser integrado directamente a una composición de mapa y compararlo con las demás capas de información evitando pasos intermedios para la visualización de los trabajos en campo.

2.3. Definición de criterios socioeconómicos para el modelo

Para seleccionar y priorizar los aspectos socioeconómicos que componen la vulnerabilidad, se realizó una búsqueda y clasificación de información teniendo en cuenta la revisión del estado del arte de indicadores de medición de la vulnerabilidad socioeconómica y se realizó un taller (panel de expertos) conformado por

administradores viales de distintas direcciones territoriales y funcionarios del Instituto Nacional de Vías de Colombia; se presentaron varios escenarios de las condiciones socioeconómicas de distintos tramos viales para que obtuvieran una comprensión suficiente de las condiciones socioeconómicas en el área de estudio, además se discutió ampliamente con los participantes sobre la relación entre los eventos de amenaza natural como las inundaciones y la afectación sobre la funcionalidad y nivel de prestación de servicio de las vías, así como las repercusiones sobre el territorio y las comunidades. Esto se realizó con el fin de realizar un ejercicio de co-creación de identificación de factores socioeconómicos que puedan ser vinculados en la medición de la vulnerabilidad socioeconómica en la red vial, y posteriormente se utilizó el método de Proceso Analítico Jerárquico (AHP) mostrando a los expertos varias comparaciones por pares de los factores socioeconómicos propuestos, para ser ponderados bajo una escala numérica con valores entre 1 y 9, como lo sugiere Saaty (1980, 1990).

Posteriormente se desarrolló el método AHP realizando la matriz de comparación y de Normalización, es decir que se identificó la fuerza e intensidad de cada factor socioeconómico para cada experto y se calculó la importancia relativa entre factores, además se estableció el vector propio y el valor Landa λ_{MAX} , y finalmente se estableció la confiabilidad del modelo AHP mediante el índice de consistencia, $IC = (\lambda_{MAX} - n/n - 1)$, y la razón de consistencia ($CR = CI/RI$) donde RI es índice de consistencia aleatoria. De esta forma de definir y priorizaron los factores socioeconómicos que hacen parte de la propuesta metodológica de este trabajo, además, se realizó una clasificación de criterios y subcriterios incluyendo las definiciones y justificación de su selección, como se muestra en las tablas 1 y 2. En síntesis, la selección de factores incluidos en la propuesta metodológica responde a la inclusión de aspectos socioeconómicos que se ven vulnerados ante una amenaza en los corredores viales, por lo que presenta una visión más amplia que la que se reconoce tradicionalmente para la vulnerabilidad por accesibilidad y/o conectividad a la red vial y a la interrupción en los servicios de la vía en un tramo (Perles et al., 2019). Por tanto, los factores incluidos no se limitan a captar información puntual sobre la funcionalidad de la vía, sino que, además, muestran una enfoque ampliado de la vulnerabilidad socioeconómica en los corredores viales.

La tabla 1, presenta la descripción de las categorías incluidas en el componentes social: 1) ubicación de la vivienda, 2) densidad de viviendas, 3) Tipo y estado de estructuras de recolección de aguas lluvias, aguas residuales y/o agua potable en la vivienda, 4) ubicación en la franja de retiro —que corresponde al espacio de terreno reservado para las carreteras, es decir, que es el espacio público a cada lado de la vía exclusivo para ella y en el cual está prohibido hacer construcciones y realizar actividades comerciales—, 5) necesidades básicas insatisfechas, 6) condiciones de susceptibilidad y 7) medios de vida insuficientes, mientras que la tabla 2, presenta la descripción de las categorías incluidas en los aspectos económicos: 1) actividad económica en la faja de retiro y 2) Tráfico Promedio Diario (TPD). Estas categorías se seleccionaron con base en la revisión de literatura y la aplicación de la metodología de evaluación multicriterio a partir del proceso de análisis jerárquico (AHP) desarrollado por Saaty (1980, 1990); la metodología fue aplicada a un grupo piloto de 45 administradores viales y funcionarios del INVIAS, es decir, que la priorización y selección de los factores sociales y económicos para medir la vulnerabilidad, fue realizada y concertada con los profesionales que permanentemente trabajan estos temas.

A partir de los aspectos definidos se establecieron las variables, a medir para la delimitación de los aspectos sociales y económicos delimitados en el paso anterior y finalmente se construyeron los indicadores (instrumento para captar la información de cada variable). Estas variables e indicadores, captan las características relevantes de la vulnerabilidad (sistema socioeconómico) desde el punto de vista de la exposición, la fragilidad y la resiliencia; en el contexto de la vulnerabilidad social y vulnerabilidad económica tal y como se indica en la tabla 3.

La exposición se reconoce como la cercanía o ubicación de los aspectos sociales (viviendas y población) y económicos (actividades productivas y los medios de vida) a los fenómenos naturales de inundación; es decir, donde los aspectos población, infraestructura y sistemas de producción se encuentran en zonas de incidencia potencial de las amenazas contempladas. La fragilidad se interpreta como la susceptibilidad en las condiciones de la infraestructura de vivienda y la población, es decir, que hace referencia al nivel de vulnerabilidad intrínseca de los elementos (sociales y económicos) expuestos a ser afectados por las amenazas por inundación y, finalmente, la resiliencia se delimita como la capacidad para anticipar, sobrevivir, resistir y recuperarse (adaptación y respuesta) ante el impacto de una amenaza, es decir, que se asocia con la posibilidad de que las comunidades puedan afrontar, recuperarse y adaptarse ante los cambios en sus condiciones normales de vida por la presencia de un desastre de inundación.

Tabla 1. Aspectos Sociales

Aspecto	Definición	Criterio	Definición	Subcriterio	Justificación
Social	Conjunto de características que reflejan la forma de organización de las comunidades, como tradiciones, idiosincrasia, costumbres, cultura, formas de relacionarse, entender la realidad y pensar, además incluye la composición y flujos de movimientos de la población, así como la estructura del hogar o la familia, condiciones de salud, educación, acceso a servicios públicos, características demográficas y de las viviendas y medios de vida que, en conjunto definen el grado de susceptibilidad ante eventos que afecten el desarrollo de una vida familiar y social en condiciones adecuadas.	Criterio 1: Condiciones de la vivienda.	Características que describen las condiciones de susceptibilidad de las personas que habita en una vivienda asociado a la exposición o fragilidad.	Ubicación de la vivienda.	Las viviendas ubicadas en zonas rurales suelen ser más vulnerables, debido a la ausencia o deficiencia en la cobertura de servicios públicos, de salud y atención de emergencias. La ubicación de la vivienda condiciona no sólo un aspecto de exposición sino también de fragilidad por ubicación, dificultad de acceso y tiempos prolongados de respuesta, que dejan en condición de desprotección a la comunidad (CEPAL, 2002).
				Densidad de viviendas.	La alta concentración de viviendas y habitantes permite tener una idea de la densidad poblacional en la zona y a su vez de la cantidad de personas que podrían estar expuestas ante un evento de movimiento en masa o inundación. La concentración de población espacialmente favorece la afectación en conjunto de asentamientos humanos, en particular en áreas marginadas que usualmente coinciden con las zonas de mayor riesgo por inundación y deslizamientos (Carreño et al., 2005).
				Tipo y estado de estructuras de recolección de aguas lluvias, aguas residuales y/o agua potable en la vivienda.	La falta o mal estado del sistema de recolección de aguas lluvia o residuales puede incidir en los movimientos en masa e inundaciones. El tipo y la presencia de servicios básicos comunitarios existentes, genera condiciones propicias para la atenuación o incremento de la vulnerabilidad ante amenazas naturales (Thomas et al., 2013).
				Ubicación en la franja de retiro.	Las fajas de retiro constituyen zonas de reserva para las carreteras (derecho de vía), estos espacios hacen parte del espacio público del corredor vial, por lo que no está permitido realizar construcciones o realizar actividades comerciales (Ley 1228 de 2008).
		Criterio 2: Condiciones y medios de vida.	Características que describen las condiciones de susceptibilidad en las de las personas por la presencia de población migrante y/o a la baja capacidad de generar ingresos en el hogar, que puede suponer una condición de fragilidad.	Necesidades básicas insatisfechas.	El acceso a infraestructura de calidad juega un papel crucial en la construcción de la resiliencia de un individuo y la reducción de la vulnerabilidad a los impactos de las amenazas naturales (Owusu & Nursey 2019).
				Condiciones de susceptibilidad.	El bajo nivel de asimilación o la baja capacidad de recuperación de las personas frente a la ocurrencia de un movimiento en masa o inundación los hace vulnerables, en este sentido la población migrante es susceptible de ser vulnerable debido a la falta de coberturas sociales y la inestabilidad económica a la que se enfrentan (Organización Internacional para las Migraciones (OIM), 2014).
				Medios de vida insuficientes.	Baja capacidad que tienen las personas de reestablecer sus medios de vida y sustento ante la ocurrencia de una amenaza natural (OIM, 2014).

Fuente: Carreño et al. 2005; CEPAL, 2002; Ley 1228 de 2008; OIM, 2014; Owusu & Nursey, 2019 y Thomas et al., 2013. Elaboración propia

Tabla 2. Aspectos Económicos

Aspecto	Definición	Criterio	Definición	Subcriterio	Justificación
Económico	Características que reflejan las formas de organización de la producción que describen una comunidad o zona, y la forma en que se distribuye y moviliza la producción, así como la generación de ingresos, relaciones productivas y generadores (vehículos) de valor agregado.	Criterio 1: Condiciones económicas	Características que describen las condiciones económicas en la faja de retiro y en el corredor socioeconómico	Actividad económica en la faja de retiro	Esta variable está principalmente asociada con el factor de exposición. Las actividades antrópicas instaladas en el territorio (industrial, comercial, agropecuaria, minería, etc.), determinan el tejido productivo y los niveles de desarrollo económico, por lo que cualquier alteración que influya negativamente en términos de pérdidas, daños, afectaciones económicas y sociales inciden en la vulnerabilidad (Thomas et al., 2013).
		Criterio 2: Dependencia económica	Características que describen el grado de dependencia de la población a la vía	Tráfico Promedio Diario (TPD)	Esta variable se asocia principalmente con la exposición. El tráfico promedio diario en un avía es una característica que describe la localización (Vera & Albarracín, 2015) y el grado de dependencia de la población a la vía; la intensidad en la movilidad de pasajeros y mercancías por una vía indica la dependencia de la infraestructura vial para la movilidad y conectividad, es decir, que a mayor movilidad (tráfico promedio diario), mayor flujo de interacciones económicas y sociales.

Fuente: Thomas et al., 2013 y Vera & Albarracín, 2015. Elaboración propia

Tabla 3. Clasificación de los aspectos sociales y culturales según tipo de vulnerabilidad

Criterio	Subcriterio	Indicador	Vulnerabilidad		
			Exposición	Fragilidad	Resiliencia
Condiciones de la vivienda	Ubicación de la vivienda	La(s) vivienda(s) se encuentra(n) ubicada(s) en zona urbana o zona rural.	X		
	Densidad de viviendas	La(s) vivienda(s) se encuentra(n) agrupadas o separadas.	X		
	Tipo y estado de estructuras de recolección de aguas	Se evidencia infiltración de agua (potable, lluvia o residual), por fallas o inexistencia de sistemas de recolección.		X	
	Ubicación en la franja de retiro	La(s) vivienda(s) se encuentra(n) ubicada(s) en la franja de retiro.	X		
Condiciones y medios de vida	Necesidades básicas insatisfechas	Índice de necesidades básicas insatisfechas.		X	
	Condiciones de susceptibilidad	En la zona se reconoce la presencia (permanente o transitoria) de población migrante.			X
	Medios de vida insuficientes	En la zona se identifica condiciones de empleo informal.		X	
Condiciones económicas	Actividad económica en la franja de retiro	Existe actividad económica en la franja de retiro.	X		
Dependencia económica	Tráfico Promedio Diario - TPD	Tráfico Promedio Diario = % automóviles + % buses.	X		

Elaboración propia

La caracterización de cada tramo de la red vial bajo los criterios anteriormente descritos implica varias confirmaciones las cuales podrán ser resueltas rápidamente a través de registros fotográficos, por ello, la aplicación diseñada, incluye la captura fotográfica de la información levantada para cada punto. La mayor parte de los descriptores del formulario son cualitativos (alto, medio y bajo), por lo que es conveniente conservar registros fotográficos de cualquier evento reportado desde cualquier enfoque y así confirmar el diligenciamiento del formulario. Pese a que las variables socioeconómicas establecidas para el modelo requieren de información confirmada de los tramos viales, también se consideran variables que podían ser obtenidas directamente de otras entidades del estado, estas son:

Tabla 4. Captura de información a partir de fuentes secundarias

Aspecto	Criterio requerido en el Modelo	Formulario de captura en campo	Entidad productora del dato	Unidad de análisis
Económico	condiciones económicas	Índice de necesidades básicas insatisfechas	DANE Colombia	Municipio
	condiciones económicas	Tráfico Promedio Diario - TPD	INVIAS Colombia	Tramo vial

Elaboración propia

En síntesis, para la definición de criterios socioeconómicos a ser incluidos en el cálculo de la vulnerabilidad se siguieron los siguientes pasos:

1. Búsqueda y revisión de literatura de vulnerabilidad social y económica.
2. Delimitación preliminar de aspectos, variables e indicadores para medir la vulnerabilidad socioeconómica en corredores viales.
3. Taller de socialización y co-creación de aspectos, variables e indicadores con administradores viales y expertos.
4. Panel de expertos para la asignación de pesos porcentuales (ponderación) de cada indicador (aplicación del método AHP).
5. Agregación de la información en la propuesta del índice para medir la vulnerabilidad social y económica: Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales (IASSEG).

La captura de información para el índice se realizó a partir del levantamiento de información primaria a través de un formulario web, como se mencionó en el apartado 2.2.

2.4. Factores socioeconómicos en el cálculo del riesgo por inundación

Teniendo en cuenta la figura 1 y la tabla 3, se evidencian los indicadores que corresponden al componente de exposición (5 indicadores), componente de fragilidad (3 indicadores) y componente de resiliencia (1 indicador);

aunque el componente de resiliencia en Vera y Albarracín (2015), está relacionado con factores como la gobernabilidad, la capacidad de ordenación y la gestión ambiental del territorio, el nivel cultural, y la capacidad de endeudamiento entre otros, en esta propuesta metodológica se utiliza como factor de resiliencia las condiciones sociales de susceptibilidad definidas como la presencia (permanente o transitoria) de población migrante. Además, los indicadores propuestos permiten captar de forma indirecta las condiciones que generan incapacidad de sobreponerse y/o adaptarse ante la materialización de un evento amenazante y para todos los casos se capta información de los factores población (comunidades y personas), infraestructura (viviendas) y sistemas de producción (actividades productivas). Una vez identificados los criterios que serán evaluados a través del formulario, se estableció una escala de valor que permitiera cuantificar las respuestas obtenidas en el trabajo de campo. Para ello, con un grupo de trabajo multidisciplinario se definieron los siguientes rangos de calificación para cada uno de los criterios evaluados y las respectivas ponderaciones de cada una de las variables.

Tabla 5. Escala de cuantificación de los aspectos sociales y económicos

Indicador	Opciones de Respuesta	Sub-opción	Escala Numérica	Escala Categórica	Peso porcentual
La(s) vivienda(s) se encuentra(n) ubicada(s) en zona urbana o zona rural	Rural		100	Alto	12,0%
	Urbana		10	Bajo	
La(s) vivienda(s) se encuentra(n) agrupadas o separadas	Más de 6		100	Alto	12,0%
	4-6		50	Medio	
	1-3		10	Bajo	
Se evidencia infiltración de agua (potable, lluvia o residual), por fallas o inexistencia de sistemas de recolección	Si existe	Constante	100	Alto	12,0%
		Intermitente	50	Medio	
	No identificado	10	Bajo		
La(s) vivienda(s) se encuentra(n) ubicada(s) en la faja de retiro	Si		100	Alto	12,0%
	No		10	Bajo	
Índice de necesidades básicas insatisfechas	Alto	0,71-1,00	100	Alto	10,0%
	Medio	0,21-0,70	50	Medio	
	Bajo	0,0-0,20	10	Bajo	
En la zona se reconoce la presencia (permanente o transitoria) de población migrante	Si existe		100	Alto	10,0%
	No existe / No identificado		10	Bajo	
En la zona se identifica condiciones de empleo informal	Si existe		100	Alto	10,0%
	No existe / No identificado		10	Bajo	
Existe actividad económica en la faja de retiro	Si existe	3 o más	100	Alto	11,0%
		2	50	Medio	
		1	10	Bajo	
Tráfico Promedio Diario = % Automóviles + % buses	71%-100%		100	Alto	11,0%
	41%-70%		50	Medio	
	0%-40%		10	Bajo	

Elaboración propia

Es importante aclarar que la anterior ponderación es intrínseca al componente socioeconómico con el fin de definir el peso que tiene cada subcomponente, no obstante, la sola presencia de estos subcomponentes no determina la vulnerabilidad *per se*, está debe ser evaluada conforme al grado de exposición, fragilidad y resiliencia a la posible amenaza de inundaciones. Con la cuantificación de cada una de las variables y sus posibles opciones de respuesta, fue posible diseñar un modelo geoespacial para la representación cartográfica de este tipo de vulnerabilidad atendiendo tanto las variables definidas, su ponderación y las relaciones espaciales que se presentan entre ellas bajo el siguiente índice compuesto que se propone:

$$IASEG = \sum_{i=1}^n [(uv_i * 12\%) + (dv_i * 12\%) + (ter_i * 12\%) + (ufr_i * 12\%) + (nbi_i * 10\%) + (cs_i * 10\%) + (mvi_i * 10\%) + (aef_i * 11\%) + (tpd_i * 11\%)] \quad \text{ecuación (2)}$$

Donde IASEG es Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales, *uv* es la ubicación de la vivienda, *dv* es la densidad de viviendas, *ter* es el tipo y estado de estructuras de recolección de aguas lluvias, aguas residuales y/o agua potable en la vivienda, *ufr* es la ubicación en la franja de retiro, *nbi* es el índice de necesidades básicas insatisfechas, *cs* son las condiciones de susceptibilidad, *mvi* son los medios de vida insuficientes, *aef* es la actividad económica en la faja de retiro, *tpd* es el tráfico promedio diario, y el subíndice *i* representa cada punto observado.

A partir del planteamiento anterior se definieron los siguientes rangos y escala que puede tomar el Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales, presentados en la Tabla 6. Entendiéndose que si el valor está entre 0-40 se considera baja vulnerabilidad socioeconómica en la zona de estudio; si el valor está entre 41-70, la vulnerabilidad sería media, mientras que si el valor del IASEG está entre 71-100, se considera vulnerabilidad socioeconómica alta.

Tabla 6. Rangos y escalas de índice de aspectos socioeconómicos globales (IASEG)

Índice	Rango	Escala
Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales (IASEG)	71-100	Alto
	41-70	Medio
	0-40	Bajo

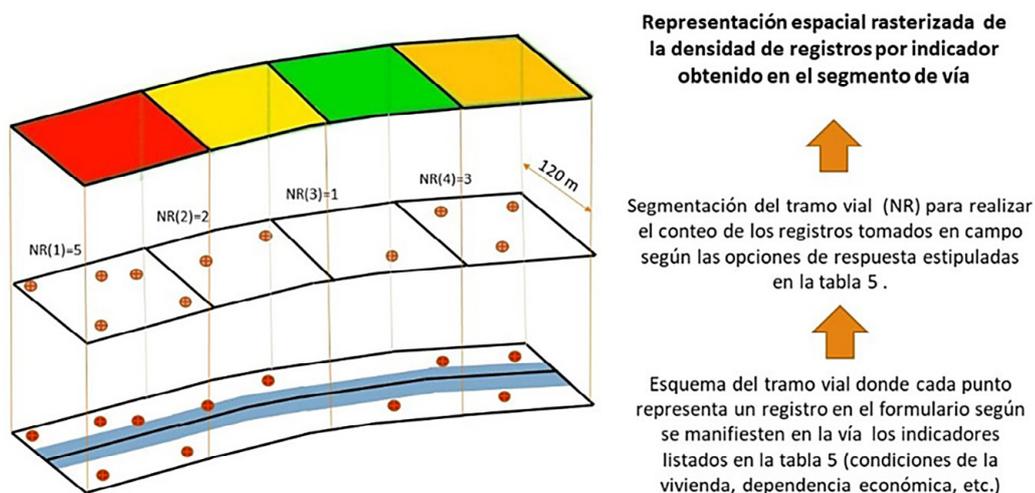
Elaboración propia

2.5 Modelo geoespacial y estructura de los datos

La ecuación (2) diseñada para integrar las variables son el fundamento del modelo espacial, pues a partir de un proceso de algebra de mapas vinculado a herramientas de sistemas de información geográfica se integran los datos respetando cada una de las valoraciones y ponderados establecidos en la formula.

Con la información capturada en el formulario de la figura 2 se genera entonces, una nube de puntos a lo largo del tramo de estudio. Cada uno de los puntos incluye los atributos de la columna *Indicadores* de la tabla 5, registrados por el operador vial en sus recorridos habituales sobre la vía. Los resultados del formulario se rasterizan mediante un análisis de proximidad y homogeneidad según el campo *Escala Categórica* de la misma tabla 5. Con este proceso se obtiene una representación continua de la condición socioeconómica que caracteriza cada tramo de estudio.

Figura 4. Representación de los puntos del formulario rasterizados



Elaboración propia

La producción de esta información cartográfica a través de una capa de puntos se manifiesta entonces como un nivel alto de detalle en la información (escala local). Estas capas fueron: i) *viviendas ubicadas en*

zona urbana o zona rural, ii) grado de agrupación de viviendas, iii) infiltración, iv) ubicación de viviendas en la franja de retiro, v) población migrante en la zona, vii) empleo informal en la zona, y viii) actividad económica en la franja de retiro, pues su resultado depende de la observación directa en campo por parte del observador.

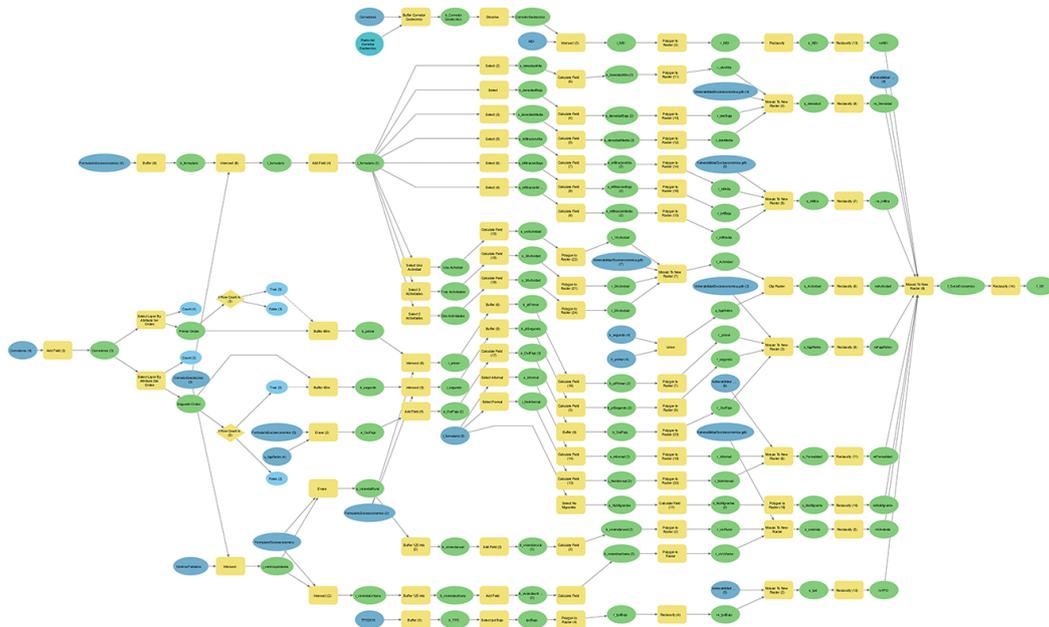
Por otro lado, la información obtenida del *índice de necesidades básicas insatisfechas* es considerado un dato a escala regional, pues es reportado a nivel municipal por el Departamento Nacional de Estadística DANE quien es la entidad encargada directamente de reportar esta cifra para el país; mientras que el indicador de *tráfico promedio diario* en el corredor vial es un dato generado por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS y se considera un dato a escala zonal, pues el reporte realizado por la entidad está establecido por cada tramo de vía.

Teniendo en cuenta lo anterior, el modelo permite identificar no sólo la densidad de ocurrencia de los eventos en cada tramo vial, sino que también respeta la multiescalaridad que presentan sus variables.

Como lo menciona De Las Heras et al. (2020), “la posibilidad de realizar un análisis espacial a un nivel de desagregación inferior al municipio no es común” (p. 18), pues a nivel Latinoamérica, la mejora en el detalle de información georreferenciada es un proceso que avanza poco a poco; sin embargo, atendiendo la variabilidad de escalas y temáticas relacionadas; se estableció una unidad mínima de análisis adimensional que permitiera identificar la trazabilidad espacial de cada una de las capas generadas por cada indicador listado en la tabla 5 . Esto quiere decir que los geoprocesamientos no obedecen a una escala única de representación cartográfica, sino que deben ser interpretados teniendo en cuenta una unidad mínima que, para este caso, fue definida como el tamaño de pixel.

Tras tener todos los indicadores de la tabla 5 rasterizados con el mismo tamaño de pixel (9 capas de información geográfica), se diseña el modelo espacial, el cual fue desarrollado mediante el software propietario ArcGIS PRO ®. Este modelo es una estructura de procesos y geodatos que organiza la información para automatizar la integración de las variables del formulario con sus respectivas valoraciones y ponderaciones para finalmente representarlas a través de capas ráster. Con esta sistematización se facilita la ejecución del proceso en el eventual ajuste a los pesos ponderados, pues sintetiza el modelo conceptual y lo plasma en un modelo lógico que permite conocer cada paso y configuración realizada bajo la aplicación *Model Builder*, la cual crea y administra el flujo de trabajo que encadena secuencias semi-automatizadas de herramientas de geoprocesamiento.

Figura 5. Esquema de Model Builder para el análisis espacial de las variables



Nota: Dimensión y complejidad del flujo de trabajo semi-automatizado¹
Elaboración propia

¹ Para lectura y consulta detallada ingrese a: <https://drive.google.com/file/d/1WGWRmf15Hym-NdYiZPlqaO0THKVQm4g1/view>

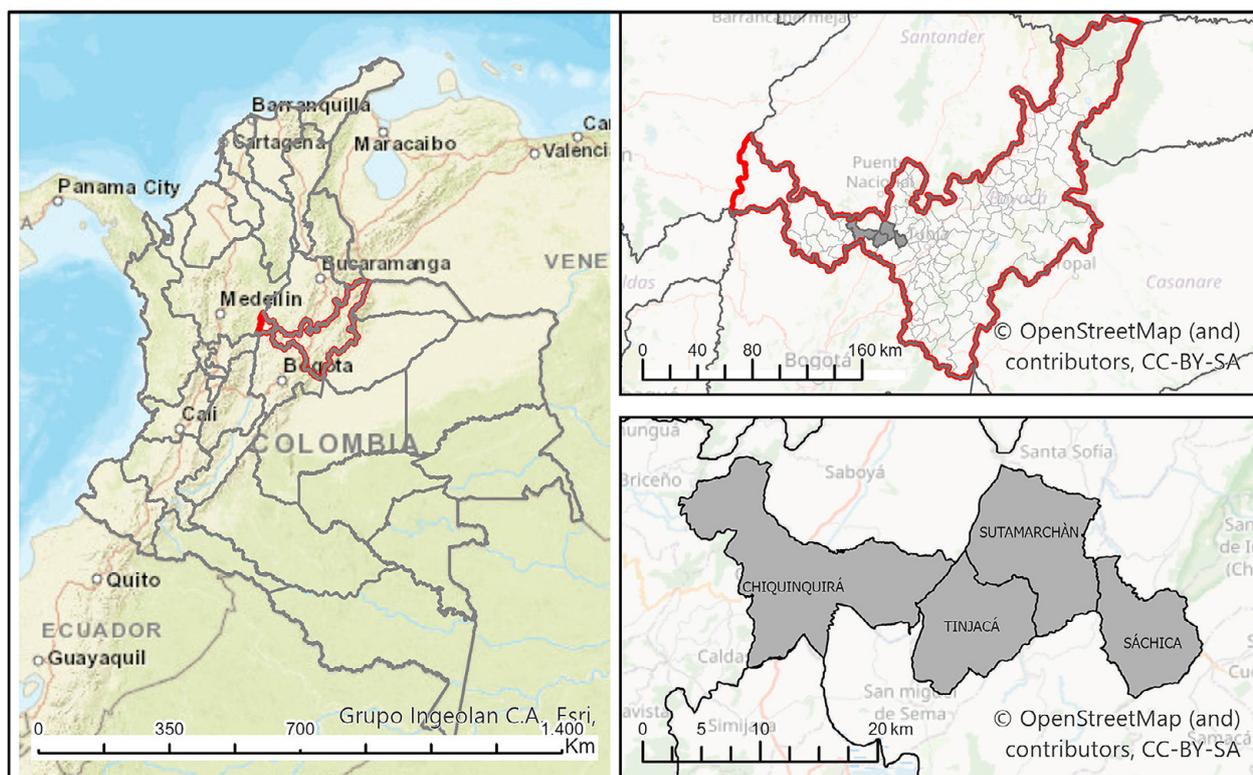
Las variables de entrada se reconocen en el modelo por ser los óvalos azules y representan las 9 capas rasterizadas del formulario que son: i) viviendas ubicadas en zona urbana o zona rural, ii) grado de agrupación de viviendas, iii) infiltración, iv) ubicación de viviendas en la franja de retiro, v) índice de necesidades básicas insatisfechas, vi) población migrante en la zona, vii) empleo informal en la zona, viii) actividad económica en la franja de retiro y ix) tráfico promedio diario en el corredor vial. Los recuadros amarillos representan los geoprocesos adelantados para la integración de las capas de información y los óvalos verdes representan los archivos geográficos de salida, producto de la integración espacial de las referidas capas.

3. Resultados

3.1. Contexto socioeconómico del área de estudio

El tramo vial “Ruta 6008” atraviesa los municipios de Chiquinquirá, Tinjacá, Sutamarchán y Sáchica, en el departamento de Boyacá, pasando por las veredas de Arrayanes, Funza, Peñas, Centro y Providencia (municipio de Tinjacá) y vereda Roa (municipio de Sutamarchán). La vocación productiva de estos municipios se basa principalmente en la agricultura, ganadería y mimería; la mayor parte de la producción agropecuaria se distribuye a través de la Ruta 6008 hacia el centro del país y la capital Bogotá, además, los cuatro municipios que atraviesa el corredor vial concentran una población cercana a 81.000 habitantes, es decir que la Ruta 6008 es un eje articulador de las condiciones sociales y económicas en el área de estudio.

Figura 6. Ubicación municipios área de estudio



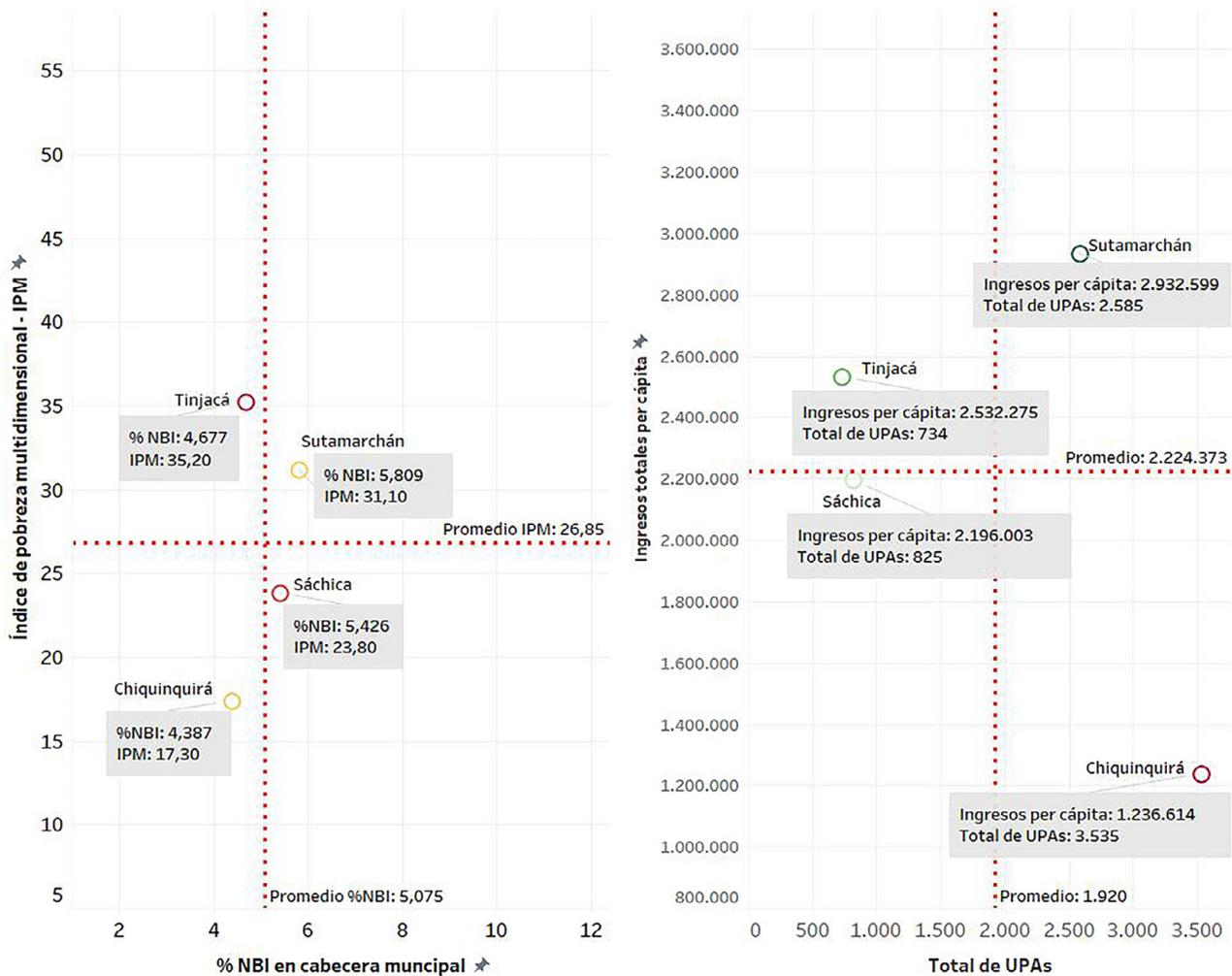
Elaboración propia

A continuación, se presenta un análisis de los cuatro municipios que hace parte del área de estudio, a partir de su comportamiento en los indicadores como el índice de pobreza multidimensional (IPM), índice de necesidades básicas insatisfechas (%NBI), de unidades productoras agrícolas (UPAs), índice de riesgo ajustado por capacidades (IRAC) y el índice de desempeño municipal (IDM), estos instrumentos al ser indicadores compuestos que incluyen varias categorías sociales y económicas, resumen bien los rasgos principales de los municipios (Botello, 2017; Feres & Mancero, 2001; Fresneda Bautista, 2007; Gutiérrez, et al., 2014)

En la parte izquierda de la figura 7 se puede observar que los municipios de Chiquinquirá y Sáchica, en términos generales, presentan buenas condiciones en aspectos socioeconómicos como el índice de pobreza multidimensional (IPM) y el índice de necesidades básicas insatisfechas (%NBI) ubicándose debajo del promedio de cada indicador (IPM: 36.85 y %NBI: 5,07). Estos niveles bajos de pobreza multidimensional y necesidades

básicas insatisfechas se corresponden con la baja especialización agrícola de los municipios (lado derecho de la figura 6), es decir que, los municipios con menos cantidad de unidades productoras agrícolas (UPAs) tienden a tener ingresos per cápita mayores, en este sentido los municipios de Sáchica, Sutamarchán y Tinjacá presentan mayores niveles de ingreso per cápita y se encuentran debajo del promedio de las UPAs, lo cual supone que la actividad agrícola en estos municipios tiene un menor peso en la economía, mientras que el municipio de Chiquinquirá se encuentra por encima del promedio de las UPAs (mayor peso de la actividad agrícola en el municipio) y registra el nivel más bajo de ingresos per cápita.

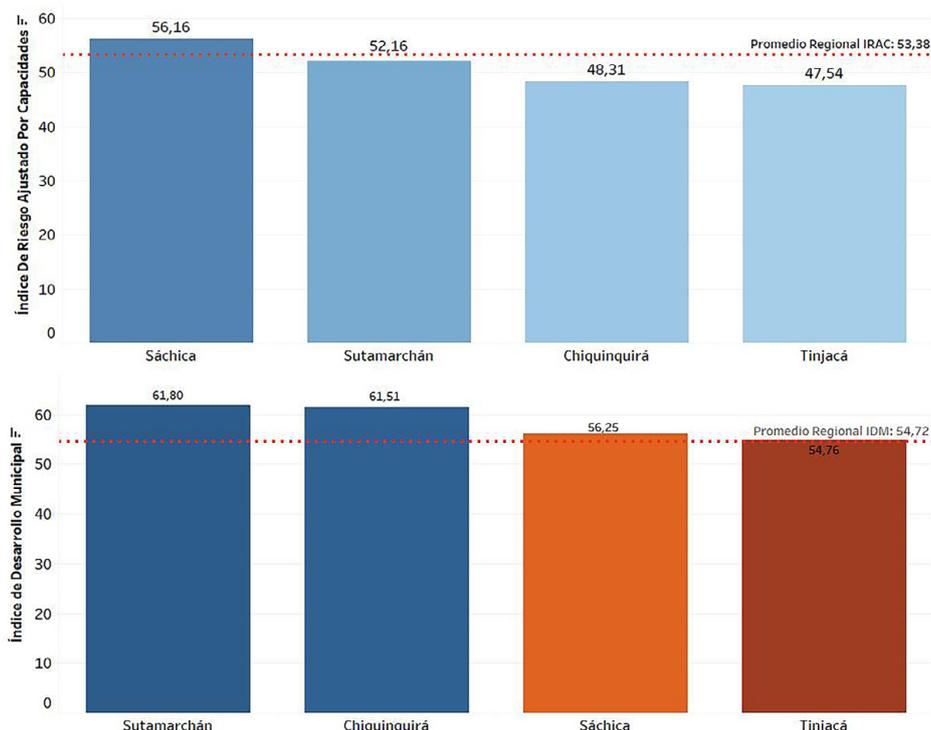
Figura 7. Índices socioeconómicos en los municipios del área de estudio



Elaboración propia

Otro rasgo distintivo de las principales características socioeconómicas en los municipios de estudio son el bajo nivel del índice de riesgo ajustado por capacidades (IRAC) y el índice de desempeño municipal (IDM). En el primer caso el IRAC mide el riesgo a nivel municipal ante eventos hidrometeorológicos y las capacidades que tienen las entidades territoriales para hacer frente a estos riesgos, mientras que el IDM sirve como una aproximación al desarrollo alcanzado por los municipios a través de las medidas de desempeño en la gestión eficiente de recursos y los resultados alcanzados. En cuanto al índice de riesgo ajustado por capacidades tres municipios se encuentran debajo del promedio regional (IRAC: 53,88%) aunque con valores cercanos al 50%, además, el municipio de Chiquinquirá se encuentra por encima del promedio (56,16%), esto indica el alto nivel de riesgo en los municipios de estudio, lo cual es consistente con los resultados evidenciados en la figura anterior, puesto que el municipio de Chiquinquirá presenta el nivel más bajo de ingresos per cápita y Tinjacá tiene el índice de pobreza multidimensional más alto, aspectos que se relacionan con la baja capacidad de respuesta ante eventos amenazantes en el corredor vial, además, una mayor proporción de pobreza y menores ingresos per cápita inciden en los factores de exposición, fragilidad y resiliencia, elevando de esta manera la vulnerabilidad en el corredor vial.

Figura 8. Índices de riesgo y desempeños en los municipios del área de estudio



Elaboración propia

Adicionalmente, la parte baja de la figura 8 evidencia que los cuatro municipios se encuentran por encima del promedio del índice de desempeño municipal (IDM: 54,72); esto llama la atención puesto que este índice evalúa 8 categorías agrupadas en 2 componentes (gestión y resultados de los municipios): movilización de recursos, ejecución de recursos, gobierno abierto y transparencia, ordenamiento territorial, educación, salud, servicios públicos y, seguridad y convivencia, es decir que estos municipios se encuentran por encima del promedio de los municipios de la región en la gestión de los recursos públicos y los resultados logrados, por lo que deberían presentar un mejor comportamiento en los indicadores de pobreza multidimensional, necesidades básicas insatisfechas y riesgo ajustado por capacidades, sin embargo, Chiquinquirá, Sáchica, Sutamarchán y Tinjacá presentan un patrón de comportamiento similar al promedio de los municipios de la región, lo que se traduce en una mayor vulnerabilidad socioeconómica en el tamo vial de la “Ruta 6008, Transversal Puerto Boyacá-Monterrey-Chiquinquirá-Sáchica, Grupo 2, PR 0 a PR 37”.

3.2. Representación geográfica de la información colectada en el formulario de captura de campo

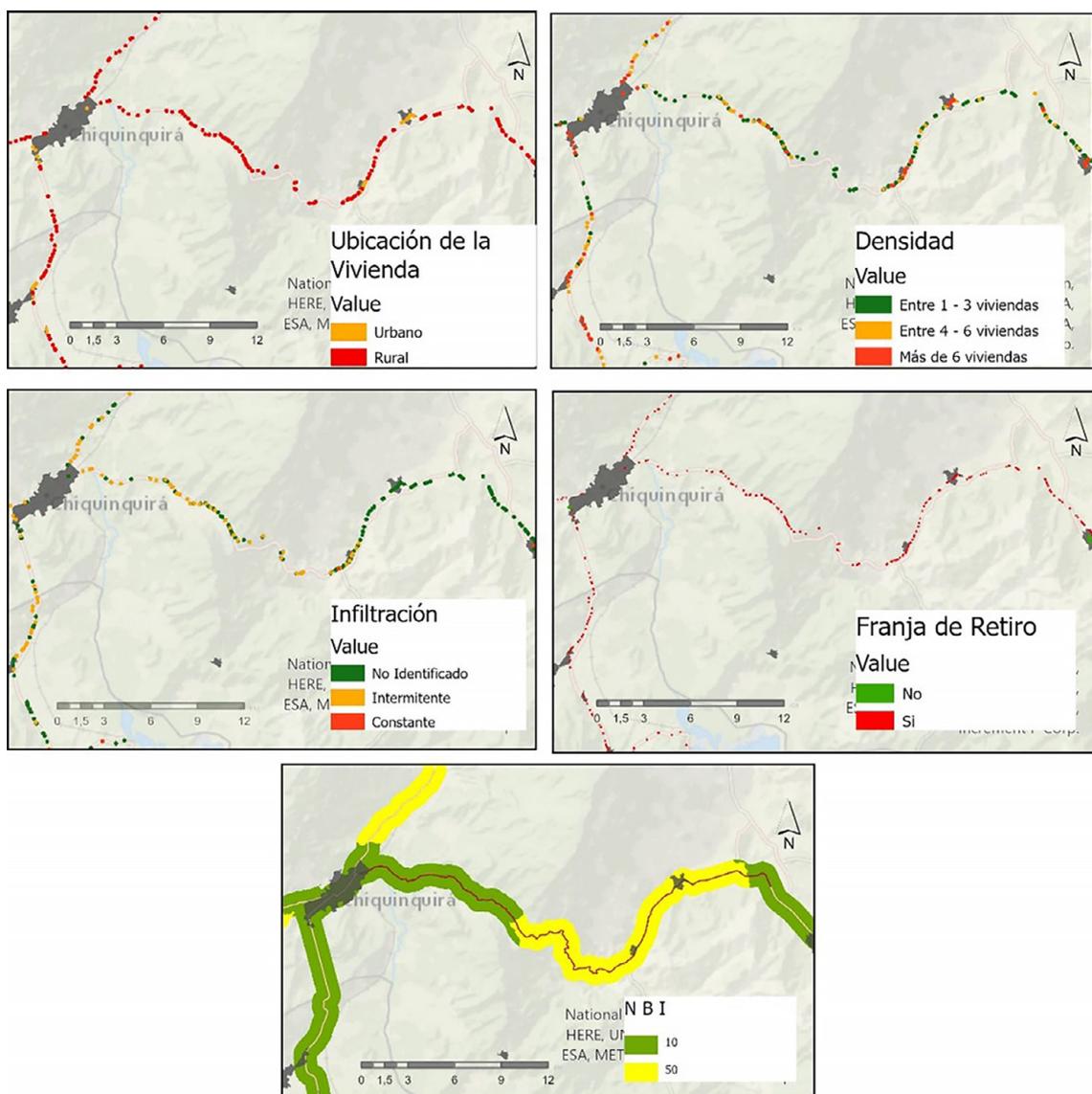
Para la representación geoespacial de los indicadores i) viviendas ubicadas en zona urbana o zona rural, ii) grado de agrupación de viviendas, iii) infiltración (agua potable, lluvia o residual), iv) ubicación de viviendas en la franja de retiro, v) índice de necesidades básicas insatisfechas, vi) población migrante en la zona, vii) empleo informal en la zona, viii) actividad económica en la franja de retiro y ix) tráfico promedio diario en el corredor vial, se realizó un proceso de geolocalización de cada punto identificado en el formulario de captura de información y se localizaron sobre los polígonos que representan para cada indicador. En el caso de la variable viviendas ubicadas en zona urbana o zona rural, se identificó si las viviendas se encuentran en centros poblados o no asignando un valor de 10 si la vivienda se encuentra en zona urbana y de 100 se encuentra en zona rural, dado que la lejanía a los centros poblados disminuye la capacidad de respuesta inmediata. En la parte superior izquierda de la figura 9 se puede observar que la mayoría de las viviendas cercanas al corredor se encuentran en zonas rurales dispersas, afectando la capacidad de respuesta inmediata de la administración municipal.

En cuanto al grado de agrupación de viviendas, este indicador identifica el grado de concentración de viviendas en la zona, es decir si existe o no asentamiento, como forma de medir la exposición, en la parte superior derecha de la figura 8 se observa que en el corredor existe un nivel bajo y medio de concentración de

viviendas, atenuando de esta manera la exposición de las viviendas. La parte central de la figura 8 presenta la información sobre la existencia de infiltración de agua potable, lluvia o residual y la ubicación de viviendas en la franja de retiro, en el primer caso, a partir de la recolección de datos por inspección visual, no se identificó infiltración en la mayor parte de corredor vial, y con relación a la ubicación en la franja de retiro se observa que la mayoría de viviendas se encuentran dentro de la franja de retiro, es decir, que están construidas a una distancia inferior a 30 metros de la vía, lo cual supone un factor de presión sobre la vulnerabilidad por exposición.

Finalmente, la parte baja de la figura 9 muestra la capa del índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI); dado que este indicador hace referencia a las condiciones de las vivienda, los ingresos y el nivel de escolaridad cuantificando criterios con construcción y materiales viviendas inadecuadas, hacinamiento crítico, acceso y calidad a servicios públicos domiciliarios, dependencia económica y niños en edad escolar que no asisten a la escuela, la cuantificación de este indicador en el corredor vial evidencia los factores asociados a las condiciones de fragilidad de las viviendas y de los medios de vida; el NBI presenta un comportamiento bajo y medio, es decir, que los centros poblados por lo que pasa el corredor vial, no presentan problemas de condiciones de vivienda inadecuadas o hacinamiento, y tampoco registran tasas alta de dependencia económica o absentismo escolar.

Figura 9. Representación geoespacial de aspectos sociales en el corredor vial

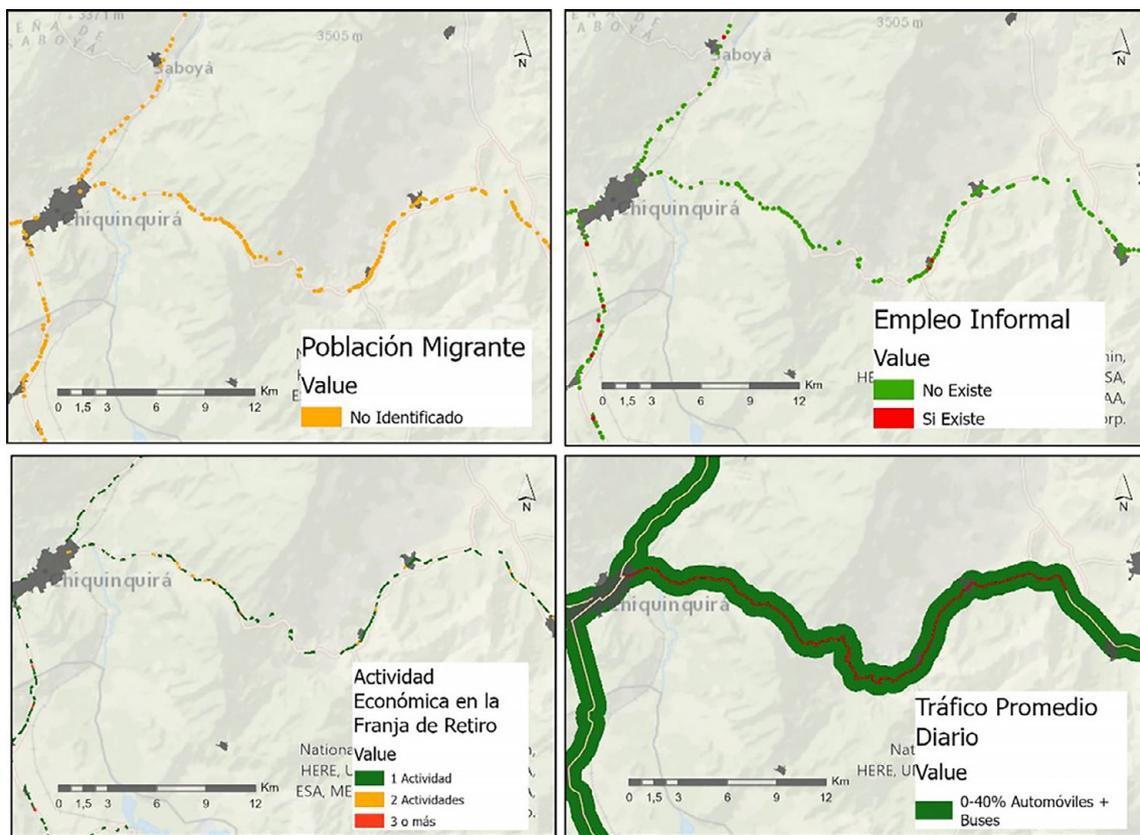


(a.) Ubicación de las viviendas; (b.) Agrupación de las viviendas; (c.) Evidencia de infiltración de agua en las viviendas; (d.) Viviendas en la franja de retiro. (e.) Necesidades básicas insatisfechas por municipio (NBI).

Elaboración propia

Por otra parte, la figura 10 muestra la representación geoespacial de los indicadores de población migrante y empleo informal en la zona, actividad económica en la franja de retiro y tráfico promedio diario en el corredor vial. En la parte superior de la figura 9 se observa la ausencia de población migrante y de empleo informal, lo que disminuye la incidencia de los factores de fragilidad y baja resiliencia en el corredor vial. La parte inferior de la figura 10 muestra los aspectos económicos de actividad económica en la franja de retiro y tráfico promedio diario en el corredor vial, los cuales miden la exposición por la presencia de actividades económicas simultáneas en la zona, como la agricultura, ganadería, comercio, industria y minería, y el grado de dependencia económica al corredor. En el primer caso se identifica que las actividades productivas con mayor frecuencia son la agricultura, la ganadería y el comercio, y que se presentan de forma simultánea dos actividades productivas máximo, de otro lado el indicador de tráfico promedio diario aproxima una medida de dependencia al corredor vial por movilidad de pasajeros (porcentaje de vehículos particulares de pasajeros y buses), este indicador registra un nivel bajo en el corredor vial (umbral entre 0% y 40%), por lo que no existe dependencia al corredor vial.

Figura 10. Representación geoespacial de aspectos económicos en el corredor vial



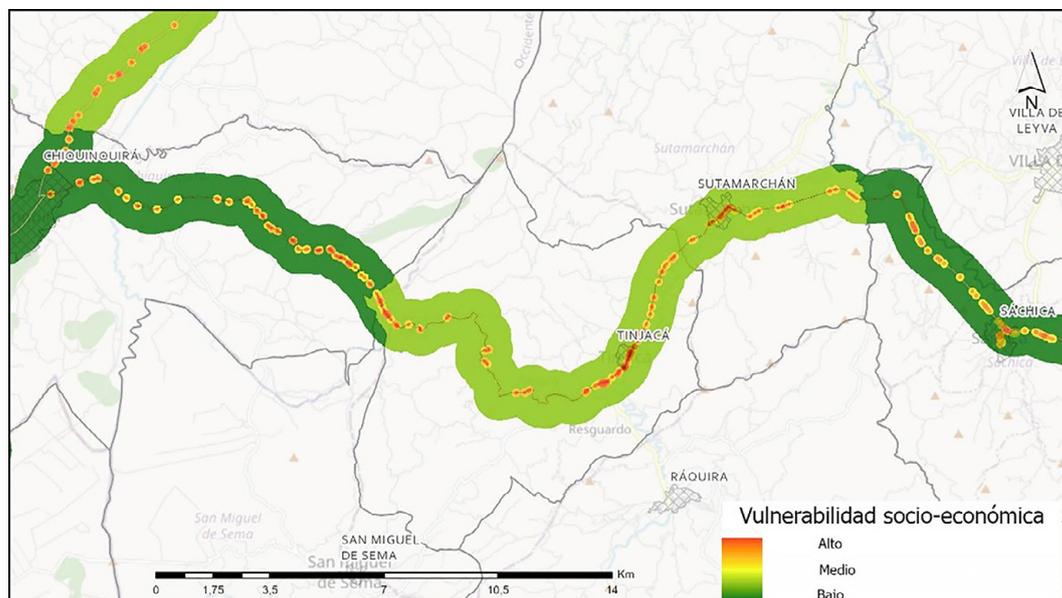
(a.) Presencia transitoria o permanente de población migrante; (b.) Empleo informal; (c.) Actividad económica en la franja de retiro; (d.) Trafico promedio diario en el corredor vial

Elaboración propia

A partir de los resultados anteriores, la superposición de capas, la evaluación de la vulnerabilidad y de la propuesta metodológica de este trabajo, presentada en los apartados de “Factores socioeconómicos en el cálculo del riesgo por inundación” y “Modelo geoespacial y estructura de los datos” de la metodología, se calculó el Índice de Aspectos Socioeconómicos Globales (IASSEG) como aproximación a la vulnerabilidad socioeconómica por ocurrencia de inundación en el corredor vial “Ruta 6008, Transversal Puerto Boyacá-Monterrey-Chiquinquirá-Sáchica, Grupo 2, PR 0 a PR 37”. Los resultados se presentan en la figura 11, cabe resaltar que el nivel de agregación de la información se dio a partir de la integración de capas con diferentes escalas, por lo que se organizó la información para el análisis espacial, en tres grupos en función al nivel de detalle de su representación espacial, ellos son: regional, zonal y local. Con este referente se puede observar la representación de los puntos a nivel local y la representación de franja para la sumatoria del nivel regional y zonal. Como se puede observar el nivel de vulnerabilidad global es bajo en el nivel regional y zonal, mientras que, en el nivel local se aprecia una densidad mayor de puntos con vulnerabilidad media y alta, esto debido

principalmente a los factores de exposición, fragilidad y capacidad de respuesta (resiliencia) en el componente social, es decir, en los componentes de condiciones de las viviendas y condiciones y medios de vida de la población.

Figura 11. Vulnerabilidad socioeconómica por ocurrencia de inundación en el corredor vial Chiquinquirá-Sáchica



Elaboración propia

4. Discusión de resultados

Los resultados del estudio revelan que, a escala local, es decir, en el corredor vial y la franja de retiro, la vulnerabilidad se ubica en el rango medio-alto, esto se explica principalmente por la densidad de población presente en el corredor vial y la franja de retiro tanto por la presencia de actividades económicas como por la presencia permanente por la ubicación de las viviendas, que sumado a la presencia de sitios susceptibles y puntos críticos por causa de fenómenos de inundación elevan el riesgo. El método propuesto en este trabajo es comparable con las propuestas metodológicas realizadas por otros autores, como por ejemplo, el estudio realizado por Hinojos et al. (2023), en este estudio los autores demuestran como la integración de escalas de información en un índice resulta determinante para la cuantificación de la vulnerabilidad; los autores seleccionan tres escalas de información: escala de condado, distrito y grupo de bloque del censo de EE. UU (Hinojos et al., 2023), con el fin de cuantificar un índice de vulnerabilidad social y exposición a inundaciones en la costa de Virginia, EE. UU, encontrado que la mayor proporción de población en la zona de estudio se encuentra en el rango de vulnerabilidad medio a alto, aunque el estudio de Hinojos y otros se realiza para una ciudad costera, lo que difiere de este estudio al analizar la vulnerabilidad en corredores viales, los dos enfoques tienen en común la agregación de información discriminada por escalas para la construcción de un índice de vulnerabilidad.

Por otra parte, otro estudio a nivel urbano y que emplea metodológicamente el enfoque de georreferenciación, es el estudio realizado por Chang et al. (2021), en este trabajo los autores abordan la vulnerabilidad de sistemas socioecológicos-tecnológicos (SETS) a partir de la construcción de un índice de vulnerabilidad a inundaciones urbanas para seis ciudades de Estados Unidos; esto autores encuentran evidencia de que las áreas más densamente pobladas se correlacionan con valores más altos de la vulnerabilidad social, lo que ocurre de igual forma con el índice propuesto en este trabajo, no obstante aunque en el trabajo de Chang y otros y en este trabajo se calcula un índice de vulnerabilidad por inundación, los resultados no son comparables puesto que la propuesta de Chang et al. (2021) agrega tres subíndices: vulnerabilidad social, vulnerabilidad ecológica y vulnerabilidad tecnológica, mientras que en este trabajo se agregan dos subíndices: vulnerabilidad social y vulnerabilidad económica específicamente para corredores viales. A pesar de esta diferencia metodológica, la construcción de indicadores sigue un planteamiento común, por lo que se evidencia un rasgo común en el enfoque metodológico abordado en este trabajo y los planteamientos metodológicos encontrados en la revisión de literatura, validando el uso de sistemas de georreferenciación y la agregación de escalas de medición para calcular un índice de vulnerabilidad social.

De otro lado, además de la utilización de datos geoespaciales, otros estudios han aplicado el proceso analítico jerárquico (AHP) para la construcción de indicadores, como el caso de Das (2020), que utiliza el análisis geoespacial y el proceso analítico jerárquico para construir indicadores ambientales y socioeconómicos para cuantificar de un índice de vulnerabilidad por inundación, realizando un mapeo de susceptibilidad a inundaciones; entre los parámetros socioeconómicos utiliza la densidad de población y la densidad de carreteras entre otros aspectos para computar mapas de susceptibilidad, vulnerabilidad y riesgo de inundaciones en una zona costera. El abordaje del método AHP también es empleado en este trabajo para establecer el conjunto de factores sociales y económicos que hacen parte en la medición de la vulnerabilidad socioeconómica en los corredores viales ante la presencia de una amenaza de origen natural en los corredores viales. A pesar tener un propósito y zona de estudio distintos, el estudio de Das (2020) emplea el análisis geoespacial, la integración de la información en capas superpuestas de georreferenciación y la utilización del método AHP para la construcción de indicadores, lo cual está en correspondencia con el enfoque abordado en esta investigación, validando los métodos utilizados en este trabajo.

Finalmente, la utilización de escalas de agregación de datos geoespaciales, aunque es una técnica ampliamente utilizada como lo muestra Sauer et al. (2023) al documentar las técnicas más utilizadas para mapear la vulnerabilidad a las inundaciones en los países en desarrollo, suele ser empleada para el estudio a nivel de ciudad como unidad territorial, es decir desde una escala a nivel comunitario o local; si bien los enfoques de análisis multicriterio basados en indicadores y sistemas de información geográfica (SIG) se utilizan de forma común para mapear la vulnerabilidad a las inundaciones (Sauer et al., 2023), este estudio se diferencia por utilizar como unidad de análisis un corredor vial y la superposición de escalas de análisis local, zonal y regional, es decir, que el análisis de la vulnerabilidad no se limita a un lugar o población (ciudad), sino que se extiende a través del territorio y la conexión con poblaciones delimitado por el la extensión y dirección de los corredores viales.

En síntesis, los métodos empleados y la propuesta metodológica de este trabajo son consistente con la literatura y aportan información adicional para la identificación de rasgos o patrones que afectan la vulnerabilidad socioeconómica en los corredores viales; como lo expone De Las Heras et al. (2020), al afirmar que, determinar patrones espaciales es un aspecto fundamental para la comprensión de cualquier fenómeno y en la propuesta de posibles medidas correctivas para su solución al determinar y delimitar las áreas más desfavorecidas. Es decir, que el modelo propuesto en este trabajo permite identificar la tendencia y patrón espacial referidos a la vulnerabilidad socioeconómica que se pueden presentar por una eventual amenaza por inundación en los corredores viales.

5. Conclusiones

La pérdida de transitabilidad por un evento de inundación no solamente genera efectos sobre la economía del país sino también en aspectos sociales y económicos pues altera directamente las dinámicas propias de cada territorio. Es por esto que la gestión del riesgo sobre los corredores viales requiere de un conocimiento detallado de la red, y para ello, herramientas geoespaciales aportan considerablemente en la articulación precisa de datos e información generada en cada corredor en tiempo real. Cada tramo de vía presenta unas condiciones particulares, por tanto, el propósito de analizar el área geográfica donde se localiza la infraestructura vial es poder aprovechar el conocimiento de los administradores viales en sus respectivos tramos, y poder documentar por observación directa las características tanto biofísicas como sociales y económicas que se manifiesten.

Se pudo constatar que la mejor forma de incorporar nuevos datos que alimenten los análisis espaciales es a través del reporte oportuno de los administradores viales en cada uno de sus tramos mediante un formulario que almacene la observación bajo unos descriptores que han sido diseñados, revisados y evaluados por cada grupo de expertos respectivamente, evitando pasos intermedios para la visualización de los trabajos en campo.

El trabajo permanente con los administradores viales para la integración de aspectos sociales y económicos, así como el entrenamiento en el uso del modelo para captura de información, y las sesiones de retroalimentación, fueron esenciales para depurar, perfeccionar y validar los indicadores y categorías de respuesta para la captura de información socioeconómica.

La metodología puede ser replicable en otros corredores viales para tener un mayor y mejor conocimiento de los factores de inciden en la vulnerabilidad socioeconómica, y poder construir en distintas escalas (local,

zonal y regional) mapas de vulnerabilidad que pueda servir a los administradores viales en la identificación los sitios con mayores vulnerabilidades.

La metodología también puede ser replicable en distintos contextos de la red vial de manera que los resultados puedan servir a los formuladores de políticas para contar con información confiable, precisa y oportuna para la construcción de estrategias de mitigación e intervención de la vulnerabilidad socioeconómica. Además, los hallazgos de este estudio ofrecen elementos esenciales para la planificación y la reducción de la vulnerabilidad por exposición, fragilidad y resiliencia (adaptabilidad) en los corredores viales.

Financiación

Esta publicación fue posible teniendo en cuenta los resultados del proyecto “Aplicación de metodologías para análisis cualitativo del riesgo con enfoque multiamenaza en la infraestructura de transporte, incluyendo variables de tipo ambiental y social que inciden en su valoración; como herramienta técnica para la generación de lineamientos para la evaluación cualitativa del riesgo en corredores viales, a escala regional, zonal y local”. Convenio especial de cooperación 949 de 2021 financiado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Vías de Colombia - INVIAS, la Universidad de La Salle y la Universidad del Quindío, por su apoyo en el desarrollo la investigación.

Referencias

- Ayala, F. & Olcina, J. (2002). *Riesgos naturales* (1st ed.). España: Ariel S.A.
- Banco Mundial (2003). *Social Risk Management: The World Bank's Approach to Social Protection in a Globalizing World*, Social Protection Department, Washington, D.C.
- Botello, S. (2017). *Avances del rediseño del índice de pobreza multidimensional de Colombia. Indicadores no monetarios de pobreza: avances y desafíos para su medición*. Santiago: CEPAL, 2017. LC/TS. 2017/149. 117-124.
- Cannon, T. (2003). "Vulnerability Analysis, Livelihoods and Disasters Components and variables of vulnerability: modelling and analysis for disaster risk management", IADB/IDEA Program on Indicators for Disaster Risk Management. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. <http://idea.unalmz.edu.co>
- Carreño, M. L., Cardona, O. D., & Barbat, A. H. (2005). Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos. Monografía CIMMNE IS-52, 166. <https://doi.org/10.13140/2.1.1658.4003>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2002). *Vulnerabilidad sociodemográfica: viejos y nuevos riesgos para comunidades, hogares y personas*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/13051/S2002632_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Chang, H., Pallathadka, A., Sauer, J., Grimm, N. B., Zimmerman, R., Cheng, C., Iwaniec, D. M., Kim, Y., Lloyd, R., McPhearson, T., Rosenzweig, B., Troxler, T., Welty, C., Brenner, R., & Herreros-Cantis, P. (2021). Assessment of urban flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework in six US cities. *Sustainable Cities and Society*, 68, 102786. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102786>
- Das, S. (2020). Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100379>
- De Las Heras, D., Adame, S., Cadena, E. G., & Campos, J. (2020). Análisis espacial del Índice de Sustentabilidad Ambiental Urbana en la Megalópolis de México. *Investigaciones Geográficas*, (73), 147–169. <https://doi.org/10.14198/INGEO2020.HGAMCVCA>
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2007). *Una aproximación a la vulnerabilidad*. https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Social/boletin34_1.pdf
- Feres, J. C. & Mancero, X. (2001). *El método de las necesidades básicas insatisfechas (NBI) y sus aplicaciones en América Latina*. Cepal.
- Fresneda Bautista, O. (2007). *La medida de necesidades básicas insatisfechas (NBI) como instrumento de medición de la pobreza y focalización de programas*. Cepal.
- Gutiérrez, E. R., Caro, J. L., & Lara, Y. A. (2014). Las unidades agrícolas familiares (UAF), un instrumento de política rural en Colombia. *Tecnogestión: Una mirada al ambiente*, 11(1).
- Hinojos, S., McPhillips, L., Stempel, P., & Grady, C. (2023). Social and environmental vulnerability to flooding: Investigating cross-scale hypotheses [Article]. *Applied Geography*, 157, 12, 103017. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103017>
- Koks, E. E., Rozenberg, J., Zorn, C., Tariverdi, M., Vousdoukas, M., Fraser, S. A., Hall, J. W. & Hallegatte, S. (2019). *A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets*. *Nature communications*, 10(1), 2677. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3>
- Ley 1228 de 2008. Por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión, para las carreteras del sistema vial nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras y se dictan otras disposiciones. 16 de julio de 2008. D.O. No. 47.052.
- Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. 24 de abril de 2012. D.O. No.48411.
- Lozano-Povis, Arlitt, Alvarez-Montalván, Carlos E., & Moggiano, Nabil. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108. <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Moser, C. O. (1998). The asset vulnerability framework: Reassessing urban poverty reduction strategies. *World Development*, 26(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(97\)10015-8](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(97)10015-8)

- Organización Internacional para las Migraciones. (2006). *Derecho Internacional sobre Migración*. Glosario sobre Migración. OIM. https://publications.iom.int/system/files/pdf/iml_7_sp.pdf
- Owusu, M. & Nursey-Bray, M. (2019). Socio-economic and institutional drivers of vulnerability to climate change in urban slums: the case of Accra, Ghana. *Climate and Development*, 11(8), 687–698. <https://doi.org/10.1080/17565529.2018.1532870>
- Perles, M.J., Pardo, S., Mérida, M., & Olcina, J. (2019). Metodología para la predicción de puntos de riesgos múltiples en infraestructuras viarias tras episodios torrenciales (road-risk). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 2615, 1–40. <http://dx.doi.org/10.21138/bage.2615>
- Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G., & Maroof, A. S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International journal of disaster risk reduction*, 14(4), 470–486. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.09.013>
- Rufat, S., Tate, E., Emrich, C. T., & Antolini, F. (2019). How valid are social vulnerability models? *Annals of the American Association of Geographers*, 109(4), 1131–1153. <https://doi.org/10.1080/24694452.2018.1535887>
- Saaty, T. (1980). *Multicriteria decision Making: The analytic hierarchy process*. McGraw Hill.
- Saaty, T. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Saldaña-Zorrilla, S. O. (2006). *Reducing economic vulnerability in Mexico. Natural disasters, foreign trade and agriculture* [Doctoral dissertation, WU Vienna University of Economics and Business]. Repositorio institucional WU Vienna Research. <https://research.wu.ac.at/en/publications/reducing-economic-vulnerability-in-mexico-natural-disasters-forei-3>
- Sánchez-González, D. & Egea-Jiménez, C. (2011) Enfoque de vulnerabilidad social para investigar las desventajas socioambientales: Su aplicación en el estudio de los adultos mayores. *Papeles de Población*, 17(69), 151–185. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252011000300006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Sauer, J., Pallathadka, A., Ajibade, I., Berbés-Blázquez, M., Chang, H., Cook, E. M., Grimm, N., Iwaniec, D. M., Lloyd, R., & Post, G. C. (2023). Relating social, ecological, and technological vulnerability to future flood exposure at two spatial scales in four US cities. *Sustainable Cities and Society*, 104880. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4204468>
- Sedano-Cruz, K., Carvajal-Escobar, Y., & Ávila-Díaz, Á. (2013). Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. *Semillas*, 46, 47–53. https://www.researchgate.net/profile/Alvaro-Avila-Diaz-2/publication/281015880_Variabilidad_climatica_cambio_climatico_y_gestion_integrada_del_riesgo_de_inundaciones_en_Colombia/links/55d5d6e308aec156b9a5ad1c/Variabilidad-climatica-cambio-climatico-y-gestion-integrada-del-riesgo-de-inundaciones-en-Colombia.pdf
- Silva-Burgos, L. & Barriga, O. (2009). Creación de un índice de vulnerabilidad social para la Provincia de Concepción desde una perspectiva teórico-empírica. *Sociedad Hoy*, 16, 59–76. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90217096005>
- Tascón-González, L., Ferrer-Julà, M., Ruiz, M., & García-Meléndez, E. (2020). *Social vulnerability assessment for flood risk analysis*. *Water*, 12(2), 558. <https://doi.org/10.3390/w12020558>
- Tate, E., Rahman, M. A., Emrich, C. T., & Sampson, C. C. (2021). *Flood exposure and social vulnerability in the United States*. *Natural Hazards*, 106(1), 435–457. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04470-2>
- Thomas, D. S., Phillips, B. D., Lovekamp, W. E., & Fothergill, A. (Eds.). (2013). *Social vulnerability to disasters*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/b14854>
- Vera, J. M. & Albarracín, A. P. (2015). *Propuesta metodológica para el análisis y espacialización de la vulnerabilidad ante amenazas hidroclimáticas, para la gestión integral del riesgo en la planificación ambiental de cuencas hidrográficas* [Master's Thesis, Universidad del Tolima]. Repositorio institucional. <https://repository.ut.edu.co/entities/publication/7eaf4fac-4e1d-4eec-87c3-92412d139f02>
- Wilches, G. (1989). *Desastres, ecologismo y formación profesional: herramientas para la crisis*. Popayan, Cauca, Colombia. Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA.
- Wilches, G. (1993). La vulnerabilidad global. In A. MASKREY (Comp.), *Los desastres no son naturales*. Red de estudios sociales en prevención de desastres en América Latina. <https://www.gub.uy/sistema-nacional-emergencias/sites/sistema-nacional-emergencias/files/documentos/publicaciones/La+vulnerabilidad+social%20WILCHES+CHAUX.pdf>

Impact of climate and demographic changes on the vegetation of the M'goun Geopark UNESCO of Morocco (1984-2021)

Impacto de los cambios climáticos y demográficos en la vegetación del Geoparque M'goun de la UNESCO en Marruecos (1984-2021)

AUTHORSHIP

Gharnit Youssef

Environmental, Ecological and Agroindustrial Engineering Laboratory, University Sultan Moulay Slimane, Faculty of Science and Technology, Beni Mellal, Morocco.

Moujane Abdelaziz

Environmental, Ecological and Agroindustrial Engineering Laboratory, University Sultan Moulay Slimane, Faculty of Science and Technology, Beni Mellal, Morocco.

Outourakht Aboubakre

Environmental, Ecological and Agroindustrial Engineering Laboratory, University Sultan Moulay Slimane, Faculty of Science and Technology, Beni Mellal, Morocco.

Aziz Hasib

Environmental, Ecological and Agroindustrial Engineering Laboratory, University Sultan Moulay Slimane, Faculty of Science and Technology, Beni Mellal, Morocco.

Abdelali Boulli

Environmental, Ecological and Agroindustrial Engineering Laboratory, University Sultan Moulay Slimane, Faculty of Science and Technology, Beni Mellal, Morocco.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25433>

CITATION

Youssef, G., Abdelaziz, M., Aboubakre, O., Hasib, A., & Boulli, A. (2024). Impact of climate and demographic changes on the vegetation of the M'goun Geopark UNESCO of Morocco (1984-2021). *Investigaciones Geográficas*, (81), 225-243. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25433>

CORRESPONDENCE

Gharnit Youssef (gharnityoussef@gmail.com)

HISTORY

Received: 24 June 2023
Accepted: 13 October 2023
Published: 26 January 2024

TERMS

© Gharnit Youssef, Moujane Abdelaziz, Outourakhte Aboubakre, Boulli Abdelali and Hasib Aziz

 This work is published under a license [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Abstract

The primary goal of this study is to identify changes in the vegetation cover of the geopark M'goun region of Morocco, as a sample area to track the Moroccan vegetation status, and the crucial factors that influenced its evolution between 1984 and 2021. The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) method has been used, combined with supervised classification manipulated with the Google Earth Engine and through statistical analysis using R, together with field trips and Google Earth records for supervised classification. The percentage of vegetation density, made up of oak groves, Matorrals, red juniper, and thuja, in addition to a highly biodiverse cover, displays a declining trend. Medium-cover vegetation decreased by 29.5%, dense vegetation decreased considerably by 70.9%, and low-cover vegetation saw a minimal decline of 0.02%. As a result, dense and medium vegetation are being replaced by bare lands or poor-quality cover formed by sparse plants and solitary trees. In addition, precipitation increased slightly, showing an irregular trend, with average minimum and maximum temperatures rising by +1.7°C and +1.4°C, respectively. Furthermore, the population increased by 84.47%. Statistical analysis showed that the most important parameters affecting medium and dense vegetation cover are temperatures (Tmin and Tmax) and population density, as evidenced by the strong correlation between them. In contrast, sparse vegetation cover showed less correlation due to its heterogeneity. However, precipitation played a minimal role in vegetation evolution. Change detection maps revealed a significant negative impact on vegetation cover. This degradation was localized in the southern part of the area of study, where, according to the demographic density map, the majority of the population resides. Deforestation continues due to the lifestyle and economic activities of the local population. These factors, combined with climate change, are exerting large-scale pressure on the forest throughout the geopark.

Keywords: vegetation cover; change detection; climate change; population; NDVI; supervised classification.

Resumen

El objetivo principal de este estudio es identificar los cambios en la cobertura vegetal de la región del geoparque M'goun en Marruecos, como área de muestra para monitorear el estado de la vegetación marroquí, y los factores cruciales que influyen en su evolución entre 1984 y 2021.

Se utilizó el método del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), combinado con clasificación supervisada manipulada mediante Google Earth Engine y análisis estadístico utilizando R, junto con visitas de campo y registros de Google Earth para la clasificación supervisada. El porcentaje de densidad de vegetación, que incluye bosques de roble, matorrales, enebro rojo y tuya, junto con una cubierta altamente biodiversa, tiende a disminuir. La vegetación de cobertura media disminuyó en un 29,5%, la vegetación densa disminuyó considerablemente en un 70,9% y la vegetación de cobertura baja experimentó una disminución mínima del 0,02%. Como resultado, la vegetación densa y de cobertura media está siendo reemplazada por tierras desnudas o coberturas de mala calidad formadas por plantas dispersas y árboles solitarios. Además, las precipitaciones aumentaron ligeramente y tendieron a ser irregulares, con un aumento promedio de las temperaturas mínimas y máximas de +1,7 °C y +1,4 °C, respectivamente. Además, la población aumentó en un 84,47%. El análisis estadístico mostró que los parámetros más importantes que afectan la cobertura de vegetación de cobertura media y densa son las temperaturas (T_{min} y T_{max}) y la densidad de población, como se evidencia por la fuerte correlación entre ellos. En contraste, la cobertura vegetal dispersa mostró una menor correlación debido a su heterogeneidad. Sin embargo, las precipitaciones jugaron un papel mínimo en la evolución de la vegetación. El mapa de detección de cambios reveló un impacto negativo significativo en la cobertura vegetal. Esta degradación se localizó en la parte sur del área estudiada, donde, según el mapa de densidad demográfica, reside la mayoría de la población. La deforestación continúa debido al estilo de vida y las actividades económicas de la población local. Estos factores, combinados con el cambio climático, están ejerciendo una presión a gran escala sobre el bosque en todo el geoparque.

Palabras clave: cobertura vegetal; detección de cambios; cambio climático; población; NDVI; clasificación supervisada.

1. Introduction

The Mediterranean is recognized as a global biodiversity hotspot (Myers et al., 2000). In addition, Mediterranean countries had an estimated forested area exceeding 85 million hectares (ha) in 2010, representing 2 percent of the world's total forested area (Berrahmouni & Christophe, 2013). However, the Mediterranean region is highly susceptible to a multitude of pressures and threats (Noce & Santini, 2018); especially human activities, such as logging, grazing, urbanization, forest fires, and agriculture, have altered the woodlands, resulting in areas of sparse woody vegetation known as maquis and garrigue (Valbuena & Pelayo, 2014), and these forests have also been impacted by excessive logging, fire, and overgrazing by livestock, particularly goats, leading to a significant degradation of their natural characteristics (Nias & Mooney, 2007). Furthermore, climate change scenarios predict massive impacts on Mediterranean forests (Solomou et al., 2017).

As a part of the Mediterranean region and situated in an arid and semi-arid climatic zone, the Moroccan ecosystems have encountered numerous challenges. Forests and woodland ecosystems in Morocco have a vital role in preserving biodiversity and supplying ecological and economic benefits (Serbouti et al., 2023), such as providing habitat for millions plants and animals (Eyvindson et al., 2018), and combat against the desertification (Benziane, 2007). Moreover, the forestry industry in Morocco has played a significant role in the country's economy, making the largest economic contribution (African Development Bank, 2000), as the quantity of wood extracted from the Moroccan forest reaches 10 million m^3 /year (Benziane, 2007; Hammouyat et al., 2022). In addition, Forest areas in Morocco cover 9 million hectares, which accounts for 12% of the national territory (Laaribya et al., 2017). This wealth is due to the uniqueness from a geographic, climatic, and ecological perspective (Berrahmouni & Christophe, 2013), the most representative forests in Morocco are *Tetraclinis articulata* forest with an area of 450,000 ha, *Argania spinosa* 450,000 ha, *Quercus rotundifolia* 400,000 ha and *Quercus suber* 400,000 ha (des Eaux & du Maroc, 1927). Nevertheless, the Moroccan forest, a significant economic and ecological heritage, continues to remain relatively unknown, and it is presently facing threats resulting from ongoing genetic deterioration (Narjisse et al., 2001) besides the desertification (Boubekraoui et al., 2023) and climate changes (Ilmen & Benjelloun, 2013) among others. Furthermore, the 13 million hectares of arid, semi-arid, and sub-humid rangelands in Morocco, 4.6 million hectares are highly degraded, and an additional 5.3 million hectares are considered moderately degraded (General Company of Technical and Economic Studies of Morocco [SOGETEG], 1983). Morocco's land use can be summarized as 5.8 million hectares of forests (8%), 9.2 million ha of agricultural lands (13%) and 46 million ha of pastures, rangelands and deserts (Dahan et al., 2013).

Several techniques are used to study and monitor vegetation resources, especially remote sensing (Karhale, 2021; Rogan & Chen, 2004; Shandilya et al., 2007), among other remote sensing satellite contributions,

Landsat is widely used (Ait El Haj et al., 2023; Cai et al., 2020; Dhaloiya et al., 2023; Milanović et al., 2019) by application of NDVI index (Ozyavuz, et al., 2015; Sonali et al., 2021) and supervised classification (Bispo et al., 2013; Salata, 2021). A study in Benslimane, nearby area, is carried out by Hammouyat et al., using the same process, revealed that the forest is declined by 11.4 % losing nearly 200 ha/year (Hammouyat et al., 2022), and Houssni et al. (2018) showed that high formations, low formations, and matorrals have regressed by 62%, 70%, and 49% respectively in the Western Rif region of Morocco (Houssni et al., 2018).

Therefore, to monitor and analyze changes in the forests of the Moroccan Atlas region, the M’goun geopark, a protected area with unique features, has been selected as an example. This assessment aims to determine the extent of vegetation cover and identify the variables and threats that have influenced its changes over time, particularly in relation to climate and population changes. Remote sensing, specifically Landsat satellite data, is utilized to track the areas covered by different vegetation classes between 1984 and 2021, using two remote sensing techniques, the NDVI index and supervised classification techniques. Additionally, change detection techniques are used to locate the affected zones and compare them with demographic density fluctuations.

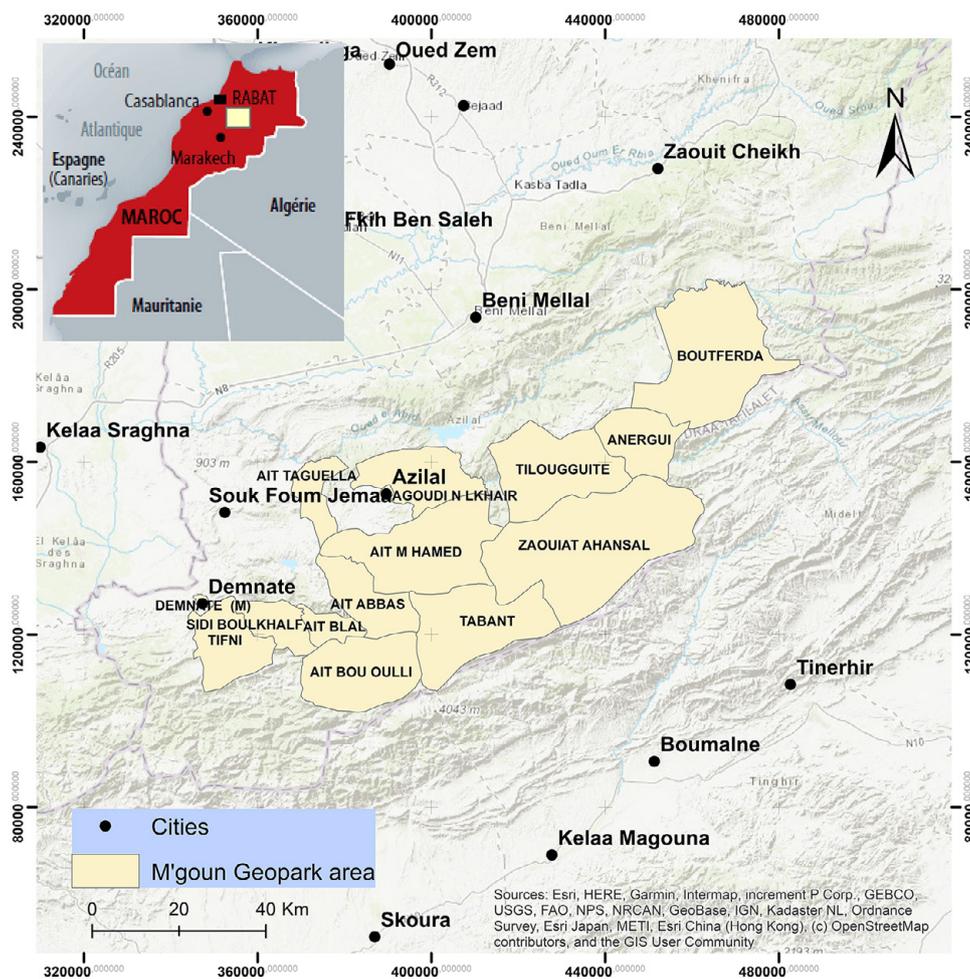
2. Methodology

2.1. Study area

The Geopark is located in the central part of Morocco (Figure 1), specifically in the Azilal province, covering an area of 9,800 km². It is part of the Central High Atlas region. The geopark has been recognized by UNESCO in 2014 as an international heritage site, encompassing an area of 5,700 km².

The entire M’goun UNESCO geopark area is characterized by mountainous terrain, with elevations ranging from 539 m to 3,695 m. The average altitude is 1,588 m, and the terrain becomes more rugged towards the south.

Figure 1. The geographic location of the study area



Own elaboration

The region's mountainous and Atlas-like terrain has a significant influence on its climate, which is typically characterized as semi-arid and Mediterranean (Taïbi et al., 2019), the winter season is cold and rainy, while the summer season is hot and dry (Ionesco, et al., 1966). The climate becomes more continental towards the high mountains, as indicated by the regional direction of Meteorology (Direction Régionale, 2010), rainfall in the region is variable and seasonal, with low-lying areas experiencing rain showers and higher altitudes receiving significant snowfall during the cold season, which may persist until July in areas such as the Azourki ranges. The average precipitation in the region ranges from 500 mm to 700 mm, with snow precipitation accounting for 20% to 30% (Taïbi et al., 2019). Temperature fluctuations are significant, with high mountains experiencing negative values during winter and temperatures exceeding 40 degrees Celsius in summer (NASA, 2021). Moreover, the region is characterized by significant soil complexity, with a variety of magmatic rocks, red siltites, evaporites, and basalts underlain by limestone formations, marl, and clayey sandstone (Gharnit et al., 2023).

The main vegetation habitats in the geopark are holm oak groves (*Quercus ilex* L.), red juniper (*Juniperus phoenicea* L.), thuja (*Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast.), Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.), and high-altitude cushions (xerophytes with *Juniperus thurifera* L.). At low altitudes of the geopark, ranging from 800 to 1,400m, *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast. is accompanied by a diverse cover, including *Ceratonia siliqua* L., *Pistacia lentiscus* L., *Olea europaea* L., *Euphorbia resinifera* O. Berg, *Phyllirea* sp., *Cistus crispus* L., *Cistus albidus* L., *Marrubium vulgare* L., and others. As elevations increase, *Juniperus phoenicea* L. gradually replaces *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast., often coexisting with the same species but with differences in abundance. *Pinus halepensis* appears from 1,200m and reaches 1,800m, forming a habitat with significant species richness, including *Thymus satureioides* Coss. ex Batt. & Trab., *Globularia alypum* L., *Lavandula* sp., and others. Holm oak appears from 1,100m to 2,400m, and this habitat undergoes pronounced changes. *Quercus ilex* has an exceptional understory with species such as *Juniperus oxycedrus* L., *Chamaerops humilis* L., *Crataegus azarolus* L., *Buxus balearica* Lam., *Arbutus unedo* L., and more. At high elevations, from 1,900m to 2,500m, *Juniperus thurifera* becomes the main species, accompanied by xerophytes like *Ormenis scariosa* (L.) Dostál, *Zylla spinosa* (L.) Pruski, *Bupleurum spinosum* L., *Astragalus* sp., *Cytisus balansae* Boiss., and others.

2.2. NDVI (Normalized Difference Vegetal Index)

NDVI, known as the Normalized Difference Vegetation Index, is a widely used vegetation index among many others (Tucker, 1979). It generates values between -1 and 1, which reflect the density of vegetation cover (Roussillon, 2016). Areas with bare rock surfaces, sand, and snow typically have low NDVI values, usually less than 0.1. Sparse vegetation such as grasses, meadows, and senescent crops typically have moderate NDVI values, ranging from approximately 0.2 to 0.5. Large NDVI values (>0.6) correspond to dense vegetation, as commonly observed in areas with dense forest or vegetation cover (United States Geological Survey [USGS], 2022).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

NIR: the reflectance at the near infrared spectrum.

R: reflectance at the red spectrum.

2.3. Supervised classification

Remotely sensed imagery identifying as the best type of data has information throughout the world (Abbas & Sabah, 2020), Classification of satellite images is an important key for ground features extraction and thematic maps production (Shwaky et al., 2018). Very common task in remote sensing applications is image classification, whose most common products include land cover maps, assessment of deforestation, burned forest areas, crop acreage, production estimation and pollution monitoring (Samaniego et al., 2008; Zhu & Basir, 2005) Supervised classification techniques are algorithms that 'learn' patterns in data to predict an associated discrete class (Stephens & Diesing, 2014). There are several classification techniques; such as maximum likelihood classification, minimum distance classification, parallelepiped classification (Richards, 1986). Maximum likelihood classification (MLC) is most widely used supervised classification and used in a variety of applications (Sisodia et al., 2014), Therefore this technique is used to perform the supervised classification.

2.4. Change detection

"Change detection" is a process that involves identifying differences in the states of an object or phenomenon (Mohamed & Mobarak, 2016). It is a method used to describe changes observed at the level of land use

(Meera Gandhi et al., 2015). In this study, the change detection method has been utilized, which involves subtracting the vegetation density map (NDVI) of the year 2021 from the year 1984 to determine, through value analysis, the areas where vegetation has flourished and the areas where it has degraded.

Locations where the vegetation has deteriorated, resulting in a decrease in density or pixel value in 2021 compared to 1984, are expected to return negative values. Sites with little or no change are expected to have values close to or equal to 0, indicating little or no difference between the two years. Positive values are expected for locations where the vegetation cover has increased, indicating positive changes in NDVI values (values are higher in 2021 compared to 1984).

2.5. Climate data

Regarding the climate data, four stations covering all the study area surface and elevation ranges have been selected; Demnate at 960 m above sea level (a.s.l), Azilal at 1,377 m, Zaouit Ahensal at 1,700 m, and Boutferda at 2,400 m. Then the mean values of each parameter, including maximal and minimal temperatures (Tmax and Tmin) and precipitation, were calculated. This data was extracted from The Climate Toolbox, a climate program developed through collaboration between CIRC (Climate impact Research consortium), USDA (United States Department of Agriculture), University of California, Northwest Climate Adaptation Science Center and others (see <https://climatetoolbox.org/>). Moreover, the Worldclim data is used to create the spatial variation of climatic variables (see <https://www.worldclim.org>).

2.6. Demographic data

Based on the results of the census carried out by The High Commission for Planning (<https://www.hcp.ma>), the official demographic data is available for 1994, 2004, and 2014, the evolution of the population and its concentration in different areas has been tracked to compare the areas affected by deforestation with the most populated zones in order to assess the impact of human population on vegetation. For the years without available data, the population is estimated using the geometric rate model: $P_n = P_0 \times (1+r)^t$ (United Nations [UN], 2016), where P_0 is the population at the beginning of the period, t is the period of time in years, r is the annual rate of increase, and P_n is the estimated population at the end of the period. This approach permits the comprehension of the changes in population and their potential correlation with vegetation changes in the study area.

2.7. Vegetation area calculation

The Landsat remote sensing data is utilized, with a spatial resolution of approximately 30 meters. The red and infrared bands is also used to establish NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) results.

To ensure high-quality results, the chosen season for this study is summer, specifically the month of August, as it is expected to have minimal effects from agriculture and grasslands, allowing for a clearer representation of natural vegetation, since, during the summer, the herbaceous vegetation degenerates, and the crops are harvested. Therefore, only natural vegetation persists. The methodology adopted in this work involves locating and identifying different types of vegetation formations (sparse, medium, and dense) on the ground and Google Earth archives with ArcGIS to determine the recovery rate as reported in table 1, then mapping them across the entire geopark using supervised classification based on shapefiles of these vegetation classes for the years where Google Earth archives are available (between 2008 and 2021) NDVI values will be determined in a subsequent phase to establish the appropriate NDVI intervals for each vegetation class (as shown in Table 2); This stage is resorted to because the image data required for supervised classification are not available. The same NDVI intervals were then applied over the remaining study period (1984-2007) using NDVI data to deduce the fluctuations in each vegetation class area. All these processes are performed using ArcGIS and Google Earth Engine environment.

Table 1. Calculation of recovery rates

Recovery rates	Cover nature
0%	bare soils
>30%	low density vegetation
<70% and >30%	medium density vegetation
>70%	high density vegetation

Own elaboration

2.8. Statistical study of the dataset

The evolution of vegetation is undoubtedly influenced by various environmental factors, including those associated with human land use in the area. While pairwise correlations between variables are important, it is also necessary to study all variables collectively to establish cause-and-effect relationships. This holistic approach is crucial in understanding how different factors interplay and shape the dynamics of vegetation in the study area, including both environmental and anthropogenic influences. Therefore, Principal Component Analysis (PCA) will be used to set the importance of each variable in each vegetation class. The basic aim of the analysis utilizing principal components is a reduction of the dimensions of the observation space in which given objects are studied (Maćkiewicz & Ratajczak, 1993). PCA is a method used to reduce the dimensionality of datasets, making them more interpretable, while striving to minimize the loss of information (Jolliffe & Cadima, 2016). FactorMineR package is used for running PCA analysis.

3. Results

3.1. The vegetation area during the month of August from 1984 to 2021

Vegetation density directly affects NDVI values; degraded forest, herbaceous, or grassland vegetation generally yields relatively low NDVI values, values produced by medium-density vegetation are typically moderate, and high-density vegetation reflects higher values. In addition, the vegetation cover presents a large-scale fluctuation (Figure 2 and 3 and table 3); the vegetation classes tend to decrease, with a different magnitude; the sparse, medium, and dense covers, lost respectively 0.02%, 29.5%, and 70.9%.

Table 2. the variation of NDVI classes according to vegetation cover classes

	NDVI range for Landsat 5	NDVI range for Landsat 8
Baren soils (+water)	Minimal value* -0.04	Minimal values* -0.1
Low density cover	0.04-0.14	0.1-0.165
Medium density cover	0.14-0.32	0.165-0.28
High density cover	0.32- maximal value	0.28- maximal values

*The choose of the minimum value is justified by the absence of the water areas
Own elaboration

Figure 2. the vegetation cover fluctuations during August between 1984 and 2021

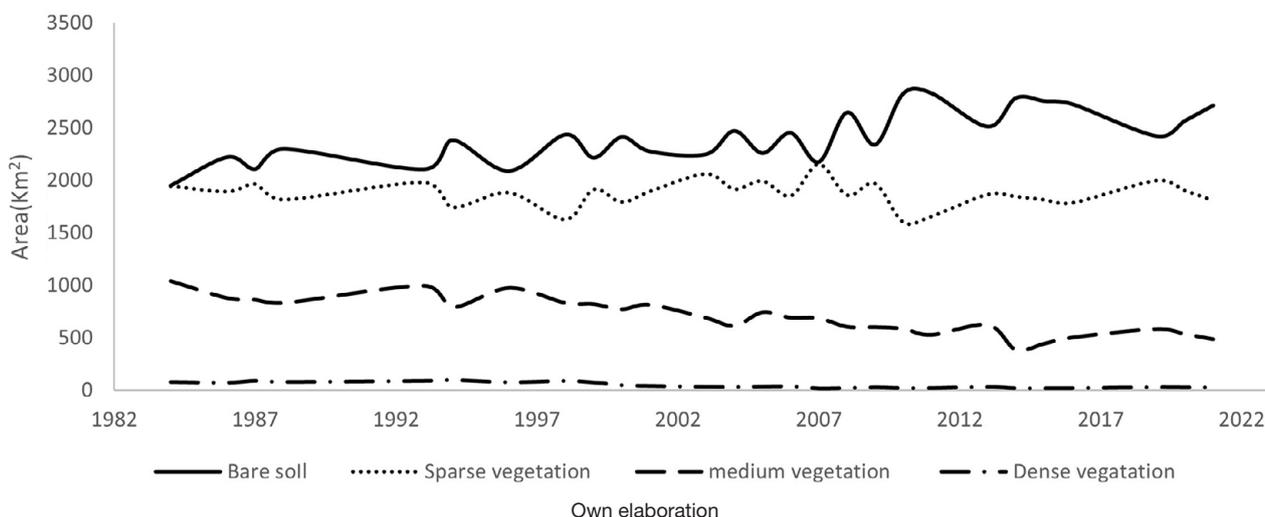
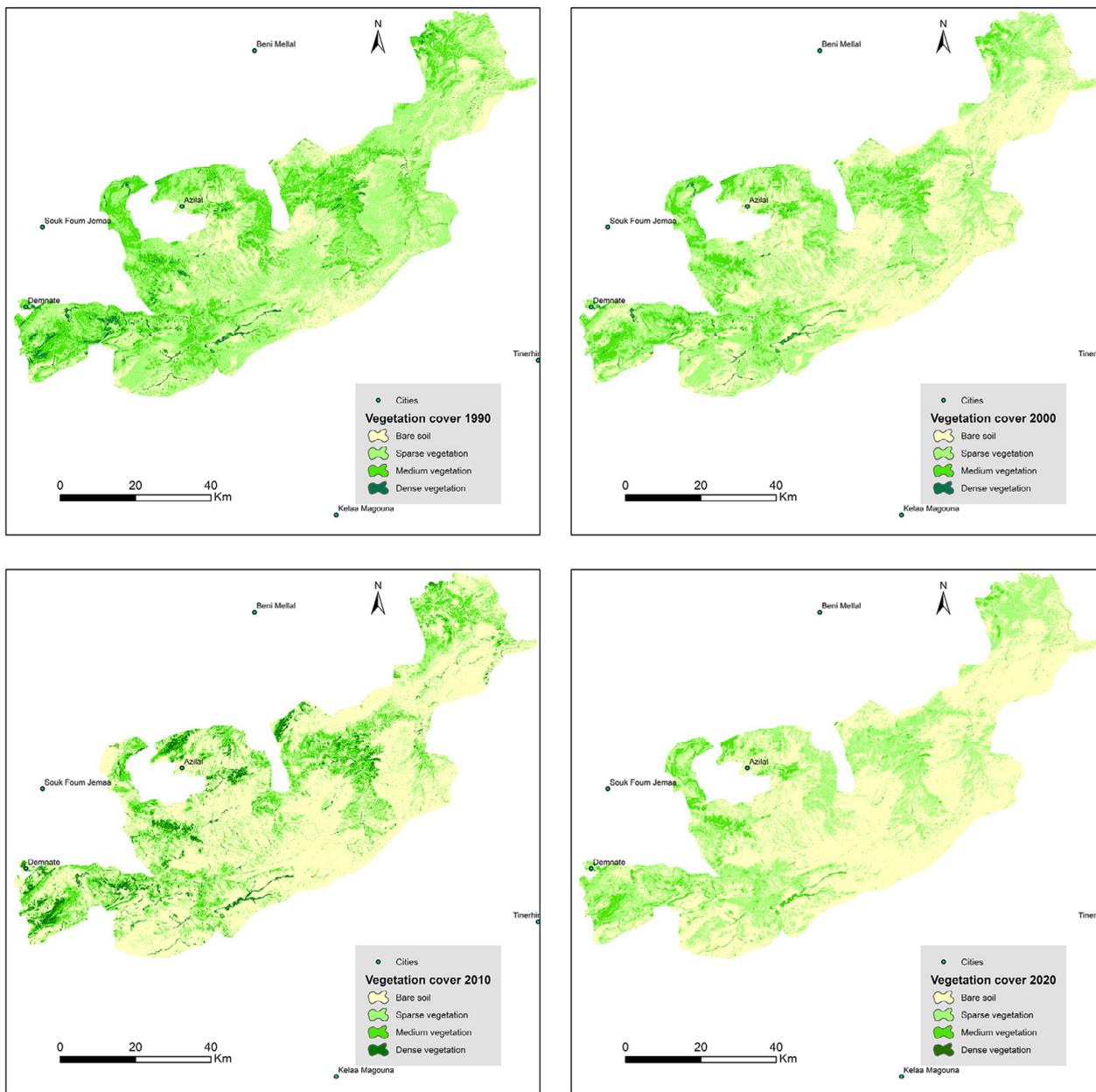


Table 3. The vegetation cover fluctuations (km²)*

Soil cover	Bare soil	Low vegetation cover	Medium cover	Dense cover
Min value (year)	1,953 (1984)	1,604.168 (2010)	444.5 (2015)	16.08 (2007)
Max value (year)	2,830.305 (2011)	2,157.079 (2007)	1,043.43 (1984)	99.85 (1994)
fluctuations	+528 km²	-49 km²	-295.34	-70.2 km²

*These fluctuations are deduced from the linear regression of each parameter
Own elaboration

Figure 3. The vegetation dynamic maps in a) 1990, b) 2000, c) 2010, and c) 2020



Own elaboration

3.2. Climate parameters

A slight increase in average annual precipitation and an increase in drought periods were recorded along the study period, however, precipitation became more erratic, as shown in Figures 4 and 5, with prolonged periods of drought.

The average annual precipitation varies within the M’goun Geopark both spatially and temporally. In 1990, the annual average maximum precipitation reached 457.26 mm, followed by 391.09 mm in 2000, 733.83 mm in 2010, and 507.23 mm in 2020. As for the annual average minimum precipitation, it was 266.33 mm in 1990, 247.13 mm in 2000, 426.46 mm in 2010, and 299.65 mm in 2020. Generally, precipitation levels are higher in the northern and western parts of the study area, gradually diminishing towards the south (Figure 5).

On the other hand, temperatures have been significantly increased, the average maximum temperatures from rose by 1.7 °C for the averaged value of the four selected locations. The average minimum temperatures from increase by 1.4 °C during the same period (Figure 6 and Table 4).

Figure 4. The variation of annual precipitation of the selected stations between 1984 and 2021

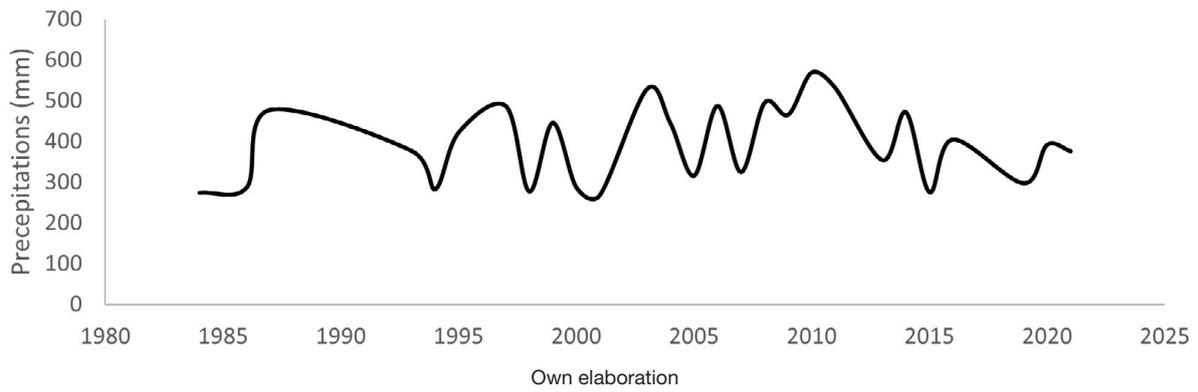


Figure 5. The variation in average annual precipitations in a) 1990, b) 2000, c) 2010, and d) 2020

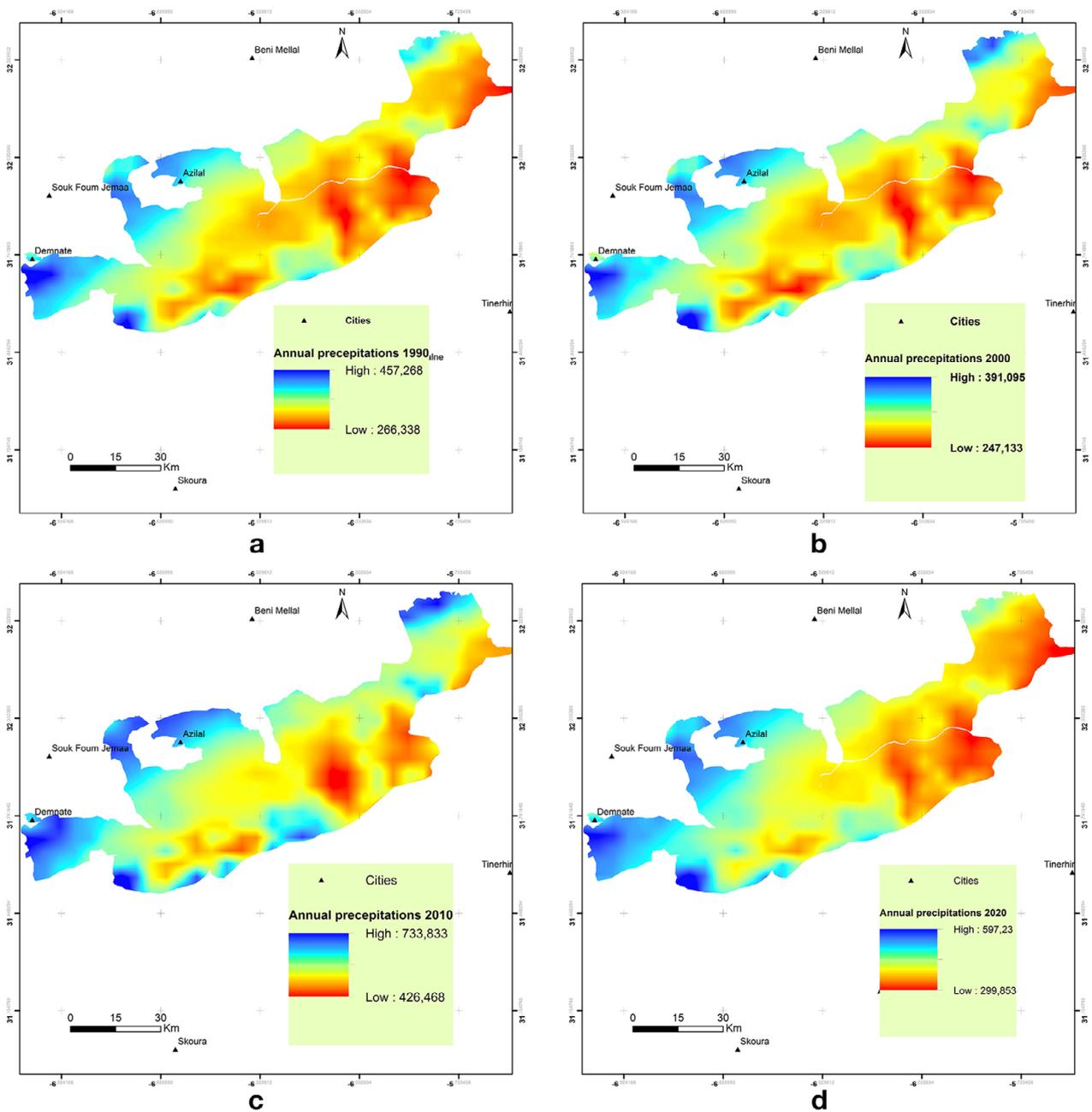


Figure 6. The average annual of maximal and minimal temperatures of the selected stations between 1984 and 2021

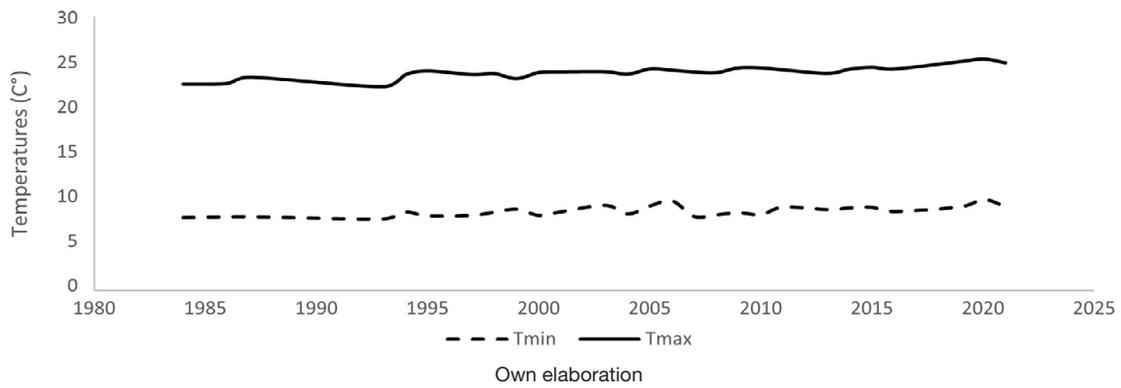


Figure 7. The average maximum temperatures variation in a) 1990 and b) 2010

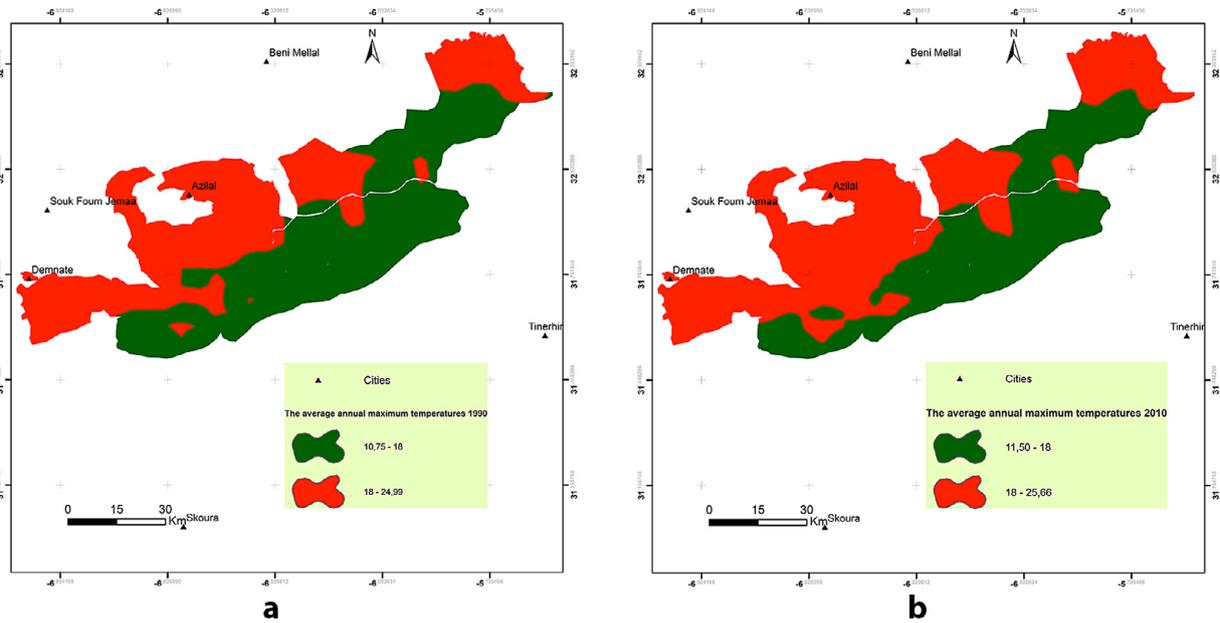
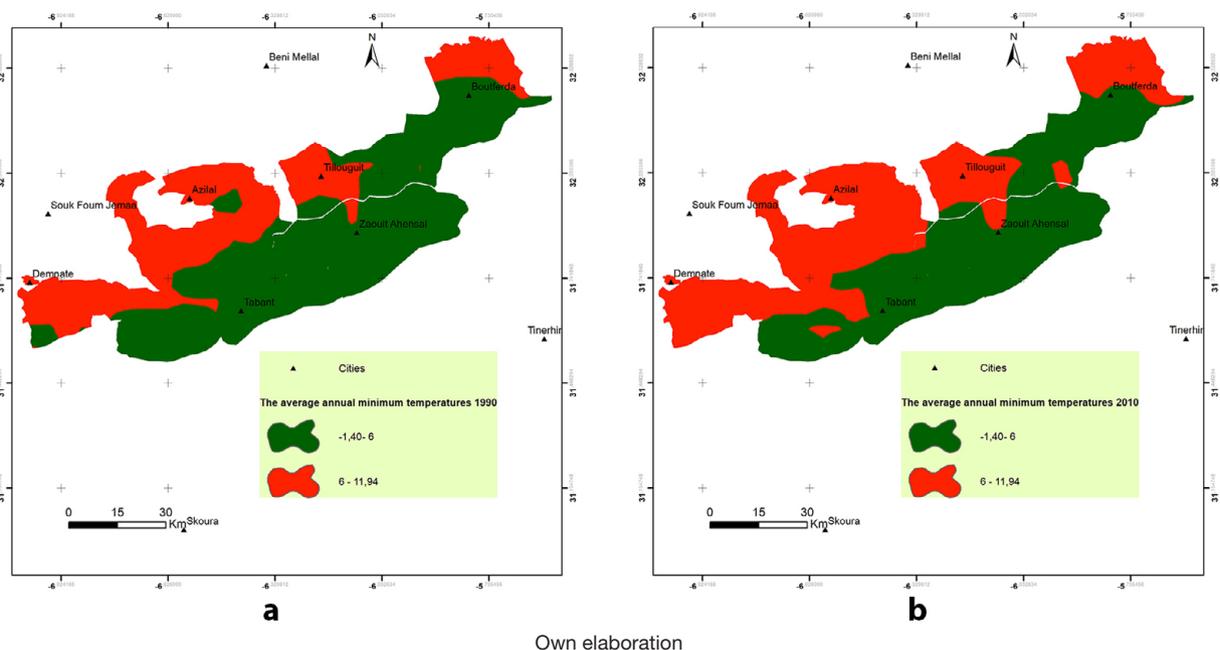


Figure 8. The average minimum temperatures variation in a) 1990 and b) 2010



The variation in average maximum temperatures reveals continuous climatic warming. Figures 7 and 8 demonstrate an increase in the area occupied by average maximum temperatures exceeding 18°C in 1990 compared to 2010, as well as the same trend for average minimum temperatures.

Table 4. the climate parameters fluctuations

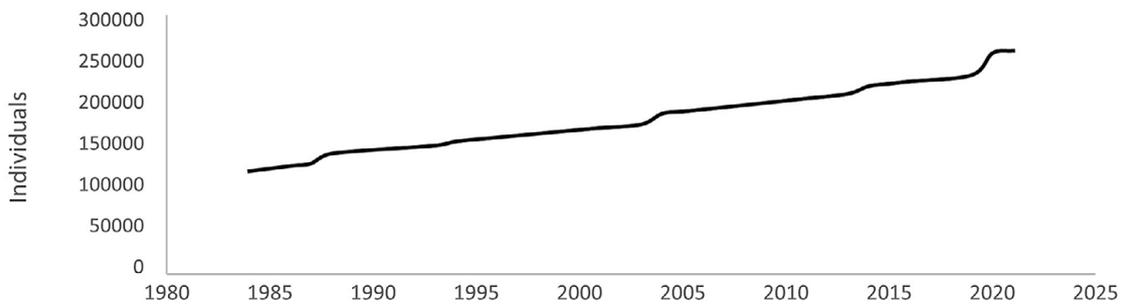
Climatic parameter	Tmax	Tmin	Precipitation
Max value	25.35 (2020)	9.98 (2020)	570.225 (2010)
Min value	22.32 (1993)	7.57 (1992)	268.325 (2001)
Fluctuations	+1.7 °C	+1.4 °C	+20 mm

Own elaboration

3.3. Demographic data

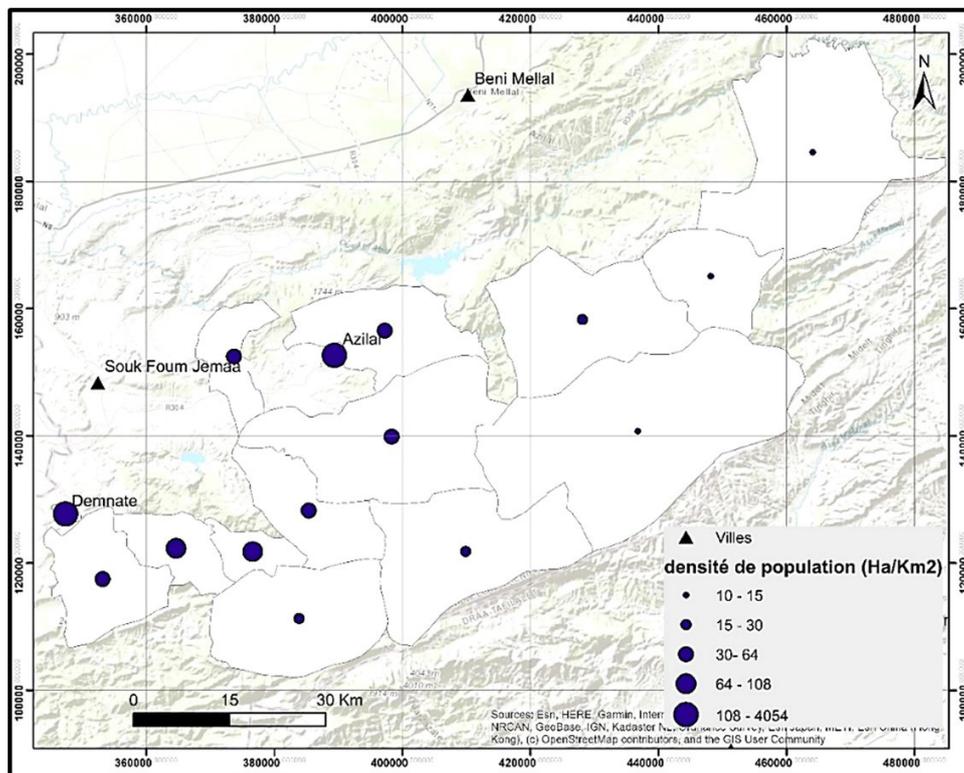
The population has grown considerably between 1984 and 2021 (Figure 9), the population rate in 1984 is 119307.88 people and 220 086.61 people in 2021. Therefore, the population inside the geopark M'goun has increased by at least 100 779 people between 1984 and 2021, which means an increase of 84.47%. The demography density map reveals that a high population density is present in the northern regions (Figure 10).

Figure 9. the population evolution between 1984 and 2021



Own elaboration

Figure 10. The population density map within M'goun Geopark

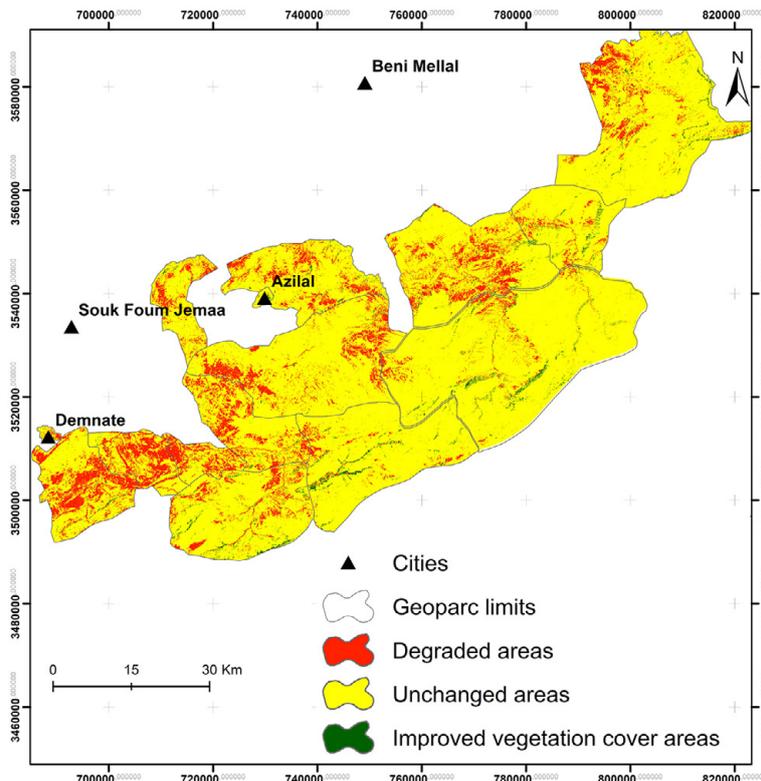


Own elaboration

3.4. The vegetation change detection map

While the southern areas of the geopark are seeing some growth in vegetation cover due to reforestation, the northern regions are mainly affected by the degradation of vegetation cover (Figure 11). Bare soils increased from 1953.00 km² in 1984 to 2714.83 km² in 2021, while sparse vegetation decreased from 1947.96 km² in 1984 to 1810.624 km² in 2021. The medium vegetation cover declined from 1043.43 km² in 1984 to 486.927 km² in 2021, and the dense vegetation cover decreased from 80.12 km² in 1984 to 25.6518 km² in 2021 (Table 5).

Figure 11. The change detection map result 1984 and 2021



Own elaboration

Table 5. The variation of Land occupation in the Geopark M'goun between 1984 and 2021

	Bare soil	Sparse vegetation	Medium vegetation	Dense vegetation
1984	1953.00	1947.96	1043.43	80.12
2021	2714.83	1810.624	486.927	25.6518

Own elaboration

3.5. The correlation climate-vegetation and population-vegetation

Pairwise correlations (Table 6) between variables show that medium cover is negatively correlated with Tmin and strongly correlated with Tmax and population. Similarly, dense cover is negatively correlated with Tmax and population.

Table 6. Correlation between vegetation cover and climatic variables with vegetation and population

	Low cover	Medium cover	Dense cover
Tmax (p-value)	ns*	-0.70 (3.634e-05)	-0.64 (0.00032)
Tmin (p-value)	ns*	-0.52(0.0046)	ns*
Precipitation (p-value)	ns*	ns*	ns*
Population (p-value)	ns*	-0.87 (1.828e-09)	-0.80 (3.784e-07)

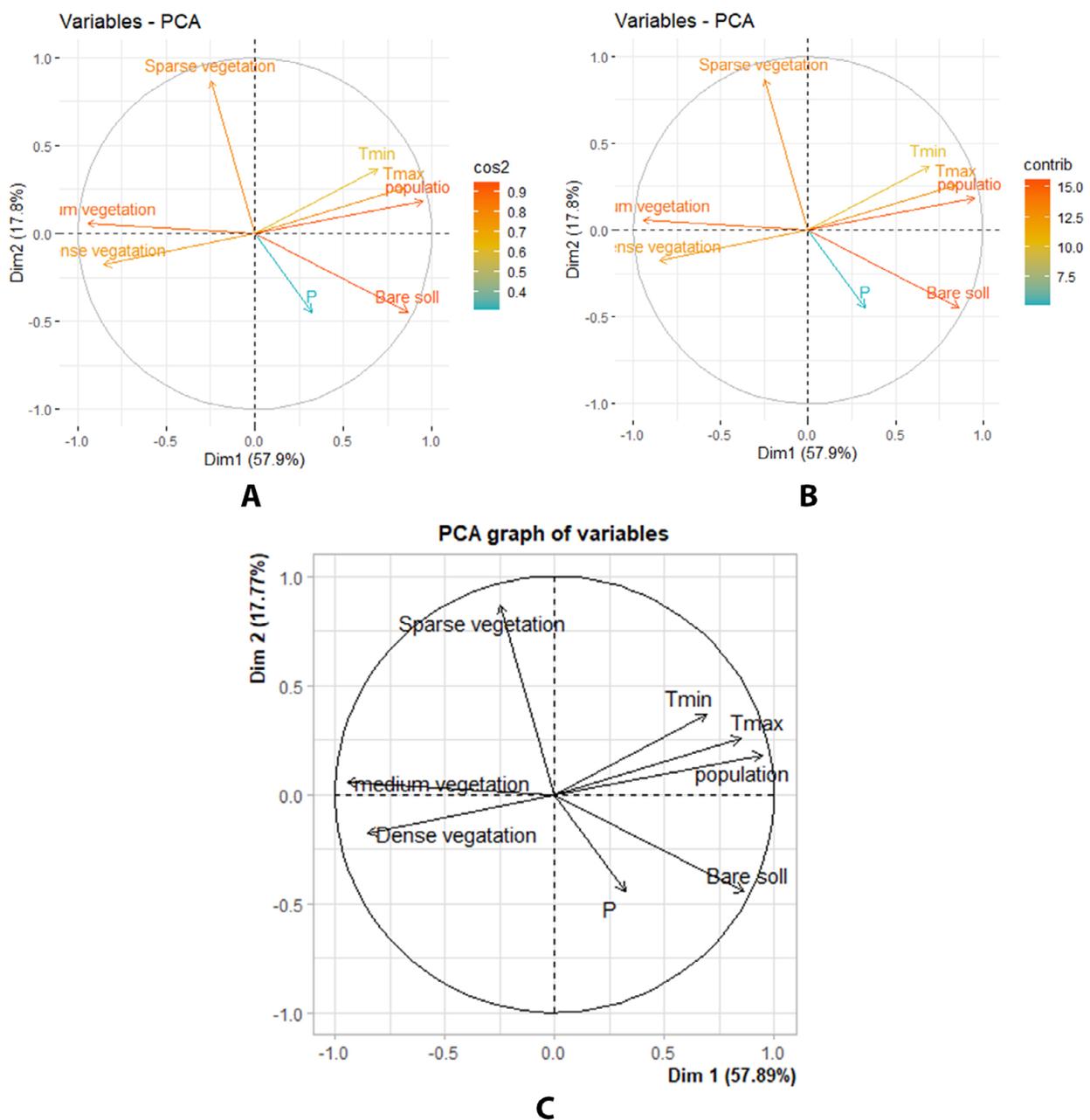
*Not significant

Own elaboration

3.6. PCA outputs

The variance explained by CP1 is 57.89%, CP2 represents 17.77%, and CP3 shows 10.8%. As a result, they together capture an accumulated explained variance of 85.66%, which represents the most important variability of the data (Figure 12). We observe that temperatures (Tmin and Tmax) and Population are grouped along the positive PC1, while medium and dense vegetation are pointed towards the negative side of CP1. Sparse vegetation is separated from other vegetation classes. Bare soil is represented in positive PC1 and negative PC2. Precipitation (P) is represented in PC3 and contributes 75% to its total variance. Population, sparse vegetation, medium vegetation, and bare soil are the variables that contribute the most to CP1 and CP2, followed by Tmax, Tmin, and dense vegetation, while precipitation has the lowest contribution to the first two principal components. The test of significance, Cos2, follows the same trend. When individuals are closer, they are more similar, with lower numbers representing the beginning of the study period and higher numbers reflecting the last year of the study period.

Figure 12. The CPA analysis results : A) the variables contributions in the CP1 and 2; B) CPA plot of the representation quality; C) CPA plot of variables



Own elaboration

4. Discussion

The area occupied by bare soil tends to increase, indicating the degradation of vegetation surfaces inside the study area. Regarding the low-density cover, it is relatively stable (with a slight decrease of 49 km²). This relative stability results from the medium- and high-density covers degrading into the low-density cover. The medium cover has large fluctuations and tends to decline, losing an average of 295 km². As for the dense vegetation cover, it lost 70.2 km² of its total area. In general, the vegetation cover has experienced significant fluctuations, on average, the rate of low-density vegetation has slightly decreased by 0.02%, while the rates of medium and high-density vegetation have decreased by 29.5% and 70.9% respectively, similar study conducted by Houssni et al. (2018) showed that high formations, low formations, and matorrals have regressed by 62%, 70%, and 49% respectively in the Western Rif region of Morocco (Houssni et al., 2018).

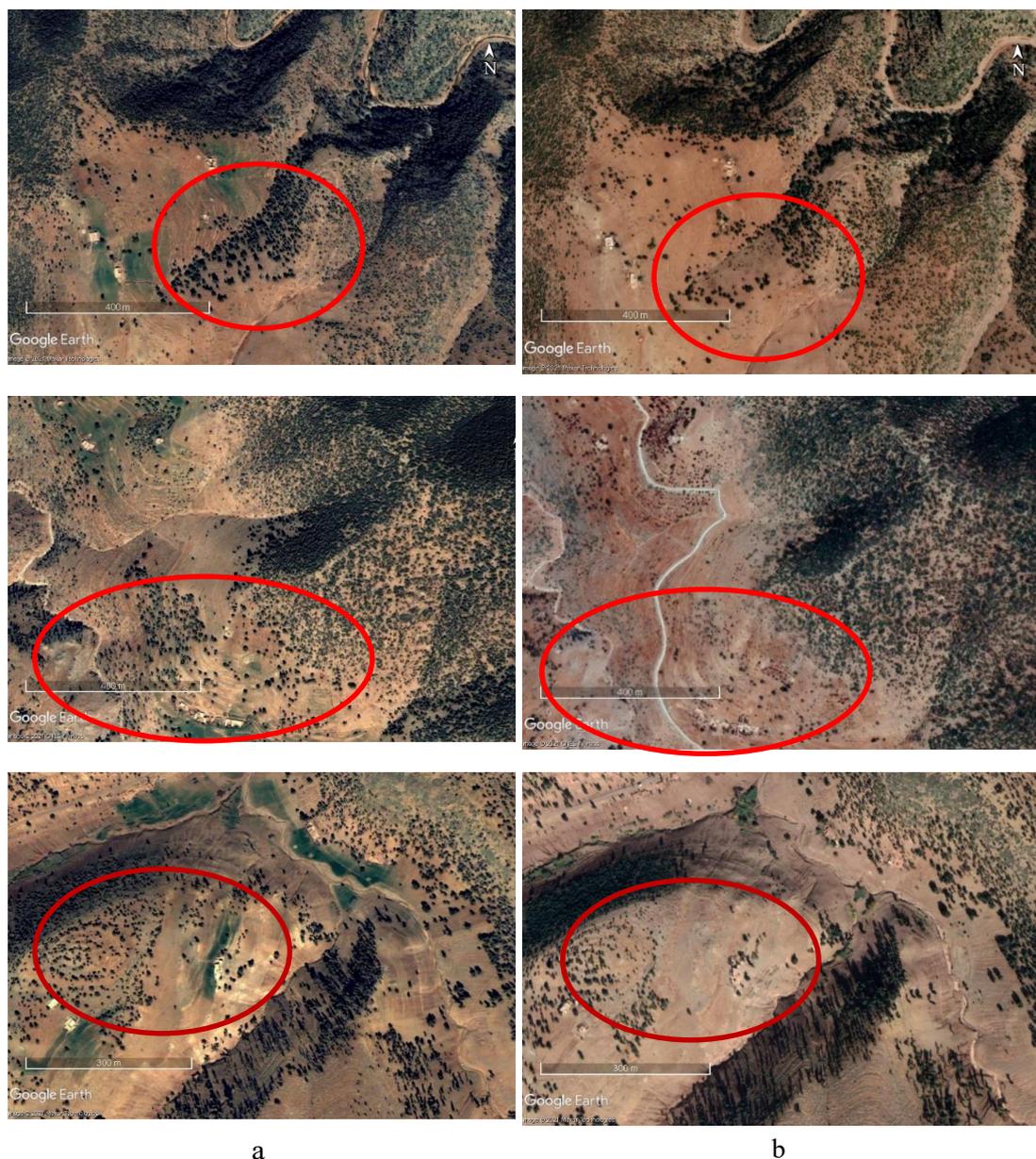
The average annual precipitation rate has slightly increased during the studied period by 20 mm, Bell et al. have underlined the precipitation understanding complexity in the High Atlas region of Morocco showing that the mean annual precipitation increases by 166 mm.km⁻¹ (150.6 to 183.7 mm km⁻¹) with a significant snow component at the highest elevations (Bell et al., 2022). However, in the last few decades, there have been long periods of drought, irregularities in rainfall (Ouharba et al., 2019), and records of both maximum and minimum temperatures, as significant warming trend has been observed, with maximum and minimum temperatures rising by 1.7°C and 1.4°C, respectively, during the study period. The same results are emphasized by Ait El-Mokhtar et al., who consider Morocco one of the most affected ecosystems by climate changes, especially drought, which deteriorates natural resources (Ait-el-mokhtar et al., 2019). This has resulted in the degradation of plants and must reduce the renewal vegetation rates. Furthermore, a study connects significant socioeconomic and agricultural advancements in North Africa to the environmental effects of climate change showed that, by 2050, rainfall in North Africa is projected to fall by 10–20% while temperatures are projected to climb by 2–3°C (Schilling et al., 2012). In addition The Land Surface Temperatures had significantly increased overall from 1984 to 2017, as it moved from a mean value of 29.4° C in 1984 to 40.4° C in 2007 and then reduced slightly to 37.9° C in 2017 (Khalis et al., 2021). Moreover, the majority of precipitation events have become stormier, which has resulted in significant erosion instead of promoting vegetation cover. Therefore, as a results of the drought episodes, in Oued Lahdar in Northeastern fully vegetated areas represented 94.3% in 1984 before deteriorating to 35.4% in 2007 (after an acute drought episode) and recovering in 2017 to 54.3%. While bare soil, which previously constituted 5.7%, reached a very high value of 64.6% in 2007 and then decreased to 47.7% (Khalis et al., 2021).

The fluctuations in vegetation during summer are slightly dependent on precipitation ($r = 0.24, 0.31, 0.23$, respectively, for sparse, medium, and dense cover). This can be attributed to irregularities in precipitation and the presence of other major variables that influence vegetation cover in the area. Moreover, fluctuations in medium and dense cover are strongly correlated with maximal temperatures ($r = -0.70, p = 3.634e-05$ for medium cover, and $r = -0.64, p = 0.00032$ for dense cover). Furthermore, medium cover is moderately correlated with minimal temperatures ($r = -0.52, p = 0.0046$). Therefore, rising temperatures are the primary climate parameter that significantly affects vegetation cover, as Morocco has witnessed unprecedented records of heat waves (Brimicombe et al., 2021). Furthermore, Akenous et al. have followed the same process, as well as this current study, in a nearby Tansift region, and have demonstrate that the temperature and vegetation cover shows a low regression coefficient value of 0.3057 and, rainfall and vegetation cover analysis show regression coefficient value of 0.7024 (Akenous et al., 2021), these differences may be explained by the dissimilarities between the two study areas. While Tansif experiences a pre-desert severe arid climate, with plants adapted to high temperature degrees, the Geopark M'goun is situated in a subhumid climate zone (Gharnit et al., 2023).

Additionally, the correlation shows an important dependence between medium cover ($r = 0.87, p=1.828e-09$), dense cover ($r = 0.8, p=3.784e-07$), and population. Moreover, comparing the population growth between the years 1984 and 2021 reveals a massive increase and a sudden demographic explosion, with the population increasing from 119,307 people to 220,086 people, an increase of 84.47%. Consequently, the impact on natural resources has been exacerbated by population growth and its needs. This important increase in the population rate profoundly affects the vegetation, as Muller et al. have studied the History of Moroccan vegetation especially in the north near to Spain showing surprising lack of human impact during the late Neolithic, little impact during Roman colonization, and anthropogenic activities however have led to severe modification during the last centuries as the understory structure of these forests are on-going deforestation that presently threatens this invaluable biological heritage (Muller et al., 2015). As a result, the major factor the shape the vegetation cover dynamism in the Atlas region of Morocco is population.

The PCA reveals that climatic and anthropogenic factors have strongly affected the vegetation evolution in the study area. It demonstrates that population, Tmin, and Tmax have a profound effect on the dense and medium cover. However, precipitation appears to have less of an effect. In contrast, the difference in the tendency of vegetation classes (dense, medium and sparse) and bare soil is an index of the desertification, in other words, the transformation of the vegetation area into the bare soils, as 93% of the Moroccan territory is affected by the phenomenon of desertification (Labbaci & Ouchaou, 2021). The relative lack of correlation between low vegetation cover density and climatic or anthropic factors may be attributed to the heterogeneity of this vegetation class. The transformation of degraded dense vegetation into sparse cover, along with the presence of dwarf palms and other signs of deterioration, replacing dominant forest species such as holm oak, juniper and thuja and contribute to this variability. Additionally, summer rainfall (Khomsi et al., 2015), despite occurring during the month of August when herbaceous vegetation is typically degraded, can still result in stormy showers or late rainfall that further affects the composition of the vegetation cover. This variability underscores the complex nature of the Atlas climate and its influence on the dynamics of this vegetation class in particular and generally the vegetation cover.

Figure 13. a) Google Earth images taken from the northern part of the geopark for the year 2008 and b) Google Earth image of the same area for the year 2020



a

b

Own elaboration

Vegetation degradation in the region can be attributed to several factors, including natural tree mortality caused by climate warming, irregular precipitation patterns, and aging plants (Dallahi et al., 2023). Additionally, deforestation for wood and charcoal, soil erosion and depletion, pollution, and the widespread use of wood for building new houses due to a lack of infrastructure for accessing modern construction materials. Moreover, one of the greatest causes of deforestation in the region is overgrazing, as the local population heavily relies on extensive cattle breeding and arboriculture as their primary source of income, the same findings are discussed by Culmsee (Culmsee, 2019). Furthermore, during the plowing season, farmers clear large areas of wild vegetation in search of new agricultural fields, leading to deforestation. Fekri Benbrahim et al. showed that the increase in agricultural land due to population growth and the expansion of export crops or livestock farming leads to deforestation and overgrazing, which promote water and wind erosion in Morocco (Benbrahim et al., 2004).

The change detection map (Figure 11) illustrates that the northern part of the geopark is particularly vulnerable to deforestation. Furthermore, the demographic density map (Figure 10) indicates that the most affected areas are characterized by high population density. Medium and dense vegetation persist in protected locations, away from human settlements and along the banks of the wadis where vegetation cover renewal is important. This deficit in vegetation cover can be observed in the field (Figure 13).

The images above provide evidence of a degradation in vegetation cover, highlighting the precarious and concerning situation of local ecosystems. The images from 2020 depict degraded and deficient vegetation cover compared to those from 2008, which is consistent with the evolutionary trend of vegetation cover deduced from remote sensing methods. These images, showing also the population's habitats, were selected from the most affected areas as identified in the change detection map. Despite the relatively short period between 2008 and 2021 compared to our study period, the vegetation cover has undergone significant fluctuation. Using the change detection technique in the northwestern region of Central Morocco confirms a decline in plant cover between 1990 and 2010, followed by an increase between 2010 and 2015, and then followed by another decline in these areas between 2015 and 2018 (Lahcen et al., 2022).

The vegetation dynamic and findings of the current study generally support the same trends as the Mediterranean regions, as Mazzoleni et al. have emphasized the major effect of human activities on vegetation in the Mediterranean basin (Mazzoleni et al., 2005) and it is noteworthy that all warming scenarios in the Mediterranean predict an increase of drought and heat events, and a reduction in precipitation (Solomou et al., 2017). Furthermore, this forest deterioration is likely to worsen the erosion of biodiversity, which constitutes one of the most significant threats affecting Mediterranean ecosystems (Underwood et al., 2009).

5. Conclusions

The vegetation cover in the High Atlas of Morocco, in general, and the M'goun Geopark, in particular, is undergoing significant changes. There is a noticeable desertification of vegetation cover, which is being replaced by lower-quality vegetation and bare lands. This degradation is attributed to a combination of factors, including climate change resulting in reduced rainfall and increasing temperatures over time. Anthropogenic factors, such as tree cutting for charcoal, wood, and firewood, along with overgrazing and forest clearing for agriculture driven by population growth and a lifestyle centered on livestock and agriculture have impacted profoundly the vegetation cover. Change detection confirms that the areas most affected by degradation, with decreased vegetation density, are located in the northern part of the geopark, where population density is important.

The current findings help us understand the evolution of vegetation cover in the High Atlas and Morocco over space and time. They also highlight the most influential factors controlling this evolution, revealing the M'goun Geopark as a fragile ecosystem. Furthermore, these findings underscore the necessity of collaboration among all stakeholders to protect the remaining vegetation and implement reforestation projects.

The study area, being part of the Mediterranean region, exhibits similar trends to the entire Mediterranean basin, which is experiencing unprecedented desertification and increasingly severe climate conditions marked by rising temperatures and overall changes in precipitation patterns. Additionally, the Geopark is situated within the Atlas Mountain range, sharing similar characteristics, thus potentially allowing for the generalization of these results to the wider Moroccan Atlas region, where vegetation cover is also under threat.

In Morocco, many regions lack detailed vegetation studies. Therefore, further research should be conducted to assess the situation in each region, make informed decisions to protect and monitor this natural treasure, implement conservation policies, and understand the long-term impact of vegetation cover.

References

- Abbas, Z., & Sabah, D H. (2020). Accuracy Assessment Of Supervised Classification Methods For Extraction Land Use Maps Using Remote Sensing And Gis Techniques. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering Paper*, 745. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012166>
- African Development Bank. (2000). *African Development Bank African Development Fund Kingdom Of Morocco Natural Resources Conservation Project Completion Report* (Issue September 2000). African Development Bank.
- Ait-El-Mokhtar, M., Ben-Laouane, R., Anli, M., & Boutasknit, A. (2019). Climate Change And Its Impacts On Oases Ecosystem In Morocco. In Information Resources Management Association (Ed.), *Research Anthology on Environmental and Societal Impacts of Climate Change* (pp. 1103-1131). Igi Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-3686-8.ch054>
- Ait El Haj, F., Haj, E., Ouadif, L., & Akhssas, A. (2023). Monitoring Land Use And Land Cover Changes Using Remote Sensing Techniques And The Precipitation-Vegetation Indexes In Morocco. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(1), 272–286. <https://doi.org/10.12912/27197050/154937>
- Akensous, Y., Sabri, A. Al, Al-Akad, S., & Hakdaoui, M. (2021). Climate Change Impact On Vegetation Dynamics In Tensift Region, Morocco. *International Journal of Environmental Science and Development*, 12(11), 326-331. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2021.12.11.1357>
- Bell, B. A., Hughes, P. D., Fletcher, W. J., Cornelissen, H. L., Rhoujjati, A., Hanich, L., & Braithwaite, R. J. (2022). Climate Of The Marrakech High Atlas , Morocco: Temperature Lapse Rates And Precipitation Gradient From Piedmont To Summits. *Arctic, Antarctic, And Alpine Research*, 54(1), 78–95. <https://doi.org/10.1080/15230430.2022.2046897>
- Benbrahim, K. F., Ismaili, M., Benbrahim, S. F., & Tribak, A. (2004). Problèmes De Dégradation De L ' Environnement Par La Désertification Et La Déforestation : Impact Du Phénomène Au Maroc. *Sécheresse*, 15(4), 307–320.
- Benzyane, D. M. (2007). La Gestion Durable Des Ressources Forestières Au Maroc: Quelle Stratégie? *Forêt Méditerranéenne*, 28(1), 47–54.
- Berrahmouni, N. & Christophe, B. (2013). *State Of Mediterranean Forests 2013* (Fao (Ed.); Issue January). Fao 2013.
- Bispo, R. C., Petrini, M.A., Lamparelli, R. A. C., & Rocha, J. V. (2013). Supervised Classification Applied To Vegetation Mapping In The Barão De Melgaço Municipality (Mato Grosso State , Brazil), Using Modis Imagery. *Geografia*, 38, 9–23.
- Boubekraoui, H., Maouni, Y., Ghallab, A., & Draoui, M. (2023). Spatio-Temporal Analysis And Identification Of Deforestation Hotspots In The Moroccan Western Rif. *Trees, Forests And People*, 12, 100388. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100388>
- Brimicombe, C., Napoli, C. Di, Cornforth, R., Pappenberger, F., Petty, C., & Cloke, H. L. (2021). Characteristics Of Heatwaves In Africa: Morocco 2000 And South Africa 2015/16. *Natural Hazards And Earth System Sciences*, 242(2021). <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-242>
- Cai, Y., Liu, S., & Lin, H. (2020). Monitoring The Vegetation Dynamics In The Dongting Lake Wetland From 2000 To 2019 Using The Beast Algorithm Based On Dense Landsat Time Series. *Mdpi Applied Sciences*, 10(12), 4209. <https://doi.org/10.3390/app10124209>
- Culmsee, H. (2019). *Vegetation And Pastoral Use In The Western High Atlas Mountains (Morocco). An Assessment Of Sustainability From The Geobotanical Perspective*. In M. A. Hamza & H. Popp (Eds.), *Actes Du 7ème Colloque Maroc-allemand, Rabat* (pp. 67-80). Faculté Des Lettres Et Des Sciences Humaines De Rabat.
- Dahan, R., Boughlala, M., Mrabet, R., Laamari, A. Balaghi, R., & Lajouad, L. (2013). *A Review Of Available Knowledge On Land Degradation In Morocco*. *AgEcon Search, Research in Agricultural & Applied economics*. Icarda.

- Dallahi, Y., Boujraf, A., Meliho, M., & Orlando, C. A. (2023). Assessment Of Forest Dieback On The Moroccan Central Plateau Using Spectral Vegetation Indices. *Journal Of Forestry Research*, 34(3), 793–808. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01525-x>
- des Eaux, D., & du Maroc, F. (1927). Les Forêts Du Maroc. *Journal d'Agriculture Traditionnelle Et De Botanique Appliquée*, 7(73), 588–592. <https://doi.org/10.3406/jatba.1927.4560>
- Dhaloia, A., Denis, D. M., Duhan, D., Kumar, R., Singh, M. C., & Malik, A. (2023). Monitoring Vegetation Health, Water Stress, And Temperature Variation Through Various Indices Using Landsat 8 Data. *Indian Journal Of Ecology*, 50(3)(June), 802–810.
- Direction Régionale. (2010). Monographie Régionale De Tadla Azilal. *Haut-Commissariat Au Plan*.
- Eyvindson, K., Repo, A., & Mönkkönen, M. (2018). Mitigating Forest Biodiversity And Ecosystem Service Losses In The Era Of Bio- Based Economy. *Forest Policy And Economics*, 92(April), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2018.04.009>
- General Company of Technical and Economic Studies of Morocco (SOGETEG). (1983). L'étude De L'aménagement Du Territoire Des Steppes De La Province De Jrada. *Centre National De Documentation*, 2020, 1–210.
- Gharnit, Y., Outourakht, A., Boulli, A., & Hassib, A. (2023). Biodiversity, Autecology And Status Of Aromatic And Medicinal Plants In Geopark M'goun (Morocco). *Annali Di Botanica*, 13. <https://doi.org/10.13133/2239-3129/18027>
- Hammouyat, A., Ichen, A., Elmalki, M., & Chahhou, D. (2022). The Degradation Of Forest Areas In Morocco: Case Of Benslimane Province. *Biosystems Diversity*, 30(4). <https://doi.org/10.15421/012238>
- Houssni, M., Ennoui, H., Ouallali, A., Kassout, J., El Mahroussi, M., Sahli, A., Bensbih, H., Kadiri, M., & Ater, M. (2018). Evolution Du Couvert Végétal Naturel Au Niveau Des Massifs Forestiers De Mallalyine Et Taghramt (Rif Occidental Du Maroc). *European Scientific Journal*, ESJ, 14(24), 19. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n24p19>
- Ilmen, R., & Benjelloun, H. (2013). Les Écosystèmes Forestiers Marocains À L' Épreuve Des Changements Climatiques. *Forêt Méditerranéenne*, Xxxiv(3), 195–208.
- Ionesco, J., Mateez, T., & Rouge, J. (1966). *Climatologie, Bioclimatologie Et Phytogeographie Du Maroc* (1st Ed.). *Les Cahiers De La Recherche Agronomique*, H, 24, 27–58.
- Jolliffe, I. T. & Cadima, J. (2016). Principal Component Analysis: A Review And Recent Developments. *Phil. Trans.R.Soc.A*, 374, 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Karhale, G. A. (2021). Applications Of Remote Sensing. *Journal Of Emerging Technologies And Innovative Research (Jetir)*, 8(6), 290–297. <https://www.jetir.org/papers/JETIR2106443.pdf>
- Khalis, H., Sadiki, A., Jawhari, F., Mesrar, H., Azab, E., Gobouri, A.A., Adnan, M., & Bourhia, M. (2021). Effects Of Climate Change On Vegetation Cover In The Oued Lahdar Watershed. Northeastern Morocco. *Plants*, 10, 1624. <https://doi.org/10.3390/plants10081624>
- Khomsi, K., Mahe, G., Trambly, Y., Sinan, M., & Snoussi, M. (2015). Trends In Rainfall And Temperature Extremes In Morocco. *Natural Hazards And Earth System Sciences*, 3, 1175–1201. <https://doi.org/10.5194/nhessd-3-1175-2015>
- Laaribya, S., Alaoui, A., & Gmira, N. (2017). The Moroccan Forest And Sustainable Development Case Of The Argan Tree *Argania Spinosa* L. Skeels In Morocco. *Biological Diversity And Conservation*, 10(2), 1–7. <https://dergipark.org.tr/en/pub/biodicon/issue/55731/762173>
- Labbaci, A. L., & Ouchaou, L. B. (2021). Assessing Land Degradation And Sensitivity To Desertification Using MEDALUS Model And Google Earth Engine In A Semi-Arid Area In Southern Morocco: Case Of Draa Watershed. *Frontiers In Science And Engineering*, 11(2), 75–88.
- Lahcen, D., Hafida, N., Souad, M., Rachid, E. H., Bejjaji, Z., & Mohamed, S. (2022). Integration Of Remote Sensing And GIS In The Identification Of The Vegetation Covers Degradation Of The Korifla Basin (NW Of Central Morocco) Between 1990 And 2018. *Earth And Environmental Science*, 975(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/975/1/012001>

- Maćkiewicz, A., & Ratajczak, W. (1993). Principal Components Analysis (PCA). *Computers & Geosciences*, 19(3), 303-342. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90090-R](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90090-R)
- Mazzoleni, S., Pasquale, D., Mulligan, M., Rego, F., & Wiley, J. (2005). *Book Reviews* (Stefano Mazzoleni (Ed.)). Wiley.
- Meera Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., & Christy, A. (2015). Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing And Gis – A Case Study Of Vellore District. *Procedia - Procedia Computer Science*, 57, 1199–1210. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>
- Milanović, M. M., Micić, T., Lukić, T., Nenadović, S. S., Basarin, B., Filipović, D. J., Tomić, M., Samardžić, I., Srdić, Z., Nikolić, G., Ninković, M. M., Sakulski, D., & Ristanović, B. (2019). Application Of Landsat-Derived Ndvi In Monitoring And Assessment Of Vegetation Cover Changes In Central Serbia. *Carpathian Journal Of Earth And Environmental Sciences*, 14(1), 119–129. <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/064>
- Mohamed, N. & Mobarak, B. (2016). Change Detection Techniques Using Optical Remote Sensing: A Survey. *American Scientific Research Journal For Engineering, Technology, And Sciences (ASRJETS)*, 17(1), 42–51.
- Muller, S. D., Rhazi, L., Andrieux, B., Bottollier-Curtet, M., Fauquette, S., Saber, E. R., Rifai, N., & Daoud-Bouattour, A. (2015). Vegetation History Of The Western Rif Mountains (NW Morocco): Origin, Late-Holocene Dynamics And Human Impact. *Veget Hist Archaeobot*, 24, 487-501. <https://doi.org/10.1007/s00334-014-0504-9>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity Hotspots For Conservation Priorities. *Nature*, 403, 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Narjisse, H., M'hirit, O., Askarn, O., Benzyane, M., & El Omeran, A. (2001). Le Couvert Végétal Marocain: État De Dégradation, Acquis Et Perspectives En Matière De Conservation Et De Mise En Valeur. *Revue HTE*, 119, 25-29.
- NASA. (2021). *Power Data Access Viewer*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Nias, R. C., & Mooney, J. R. (2007). Endangered Ecosystems. *Encyclopedia Of Biodiversity*, 1-15. <https://doi.org/10.1016/B0-12-226865-2/00096-1>
- Noce, S. & Santini, M. (2018). Mediterranean Forest Ecosystem Services And Their Vulnerability. *Meteorological Environmental Earth Observation*.
- Ouharba, E. H., Triqui, Z., & MoussaDek, R. (2019). Impact Of Climate Change On The Bouregreg Watershed Vegetation And Forest Of Morocco. *International Journal Of Advances In Scientific Research And Engineering (IJASRE)*, 5(8), 109-132. <https://doi.org/10.31695/IJASRE.2019.33440>
- Ozyavuz, M., Bilgili, B. C., & Salici, A. (2015). Determination Of Vegetation Changes With Ndvi Method. *Journal Of Environmental Protection And Ecology*, 16(1), 264–273.
- Richards, J. (1986). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02462-1>
- Rogan, J., & Chen, D. (2004). Remote Sensing Technology For Mapping And Monitoring Land-Cover And Land-Use Change. *Progress In Planning*, 61(4), 301–325. [https://doi.org/10.1016/S0305-9006\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0305-9006(03)00066-7)
- Roussillon, J. (2016). Développement De Méthodes Innovantes De Cartographie De L' Occupation Du Sol À Partir De Séries Temporelles D' Images Haute Résolution Visible (NDVI). *Sciences De L'Ingénieur [Physics]*, Dumas-01339899. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01339899>
- Salata, S. (2021). The Utilization Of Supervised Classification Sampling For Environmental Monitoring In Turin (Italy). *Sustainability*, 13(5), 2494. <https://doi.org/10.3390/su13052494>
- Samaniego, L., Bárdossy, A., & Schulz, K. (2008). Supervised Classification Of Remotely Sensed Imagery Using A Modified K-Nn Technique. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 46(7), 2112-2125. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.916629>

- Schilling, J., Freier, K. P., Hertig, E., & Scheffran, J. (2012). Climate Change, Vulnerability And Adaptation In North Africa With Focus On Morocco. *Agriculture, Ecosystems And Environment*, 156, 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.04.021>
- Serbouti, S., Ettaqy, A., Boukcim, H., & Mderssa, M. El. (2023). Forests And Woodlands In Morocco: Review Of Historical Evolution, Services, Priorities For Conservation Measures And Future Research. *International Forestry Review*, 25(1), 121-145(25). <https://doi.org/10.1505/146554823836838745>
- Shandilya, K. K., Shukla, S. P., & Pathak, V. (2007). Applications Of Remote Sensing. *Horizons In Earth Science Research*, 10, 1-9.
- Shwaky, M. A., Amer, F. E. H., Mosa, O. M., & Hamza, E. (2018). A Comparative Study Of Supervised Classification Techniques For Multi-Spectral Images. *The International Conference On Electrical Engineering Iceeng*, 11, 1-13. <https://doi.org/10.21608/iceeng.2018.30172>
- Sisodia, P. S., Tiwari, V., & Kumar, A. (2014). Analysis Of Supervised Maximum Likelihood Classification For Remote Sensing Image. *IEEE International Conference On Recent Advances And Innovations In Engineering (Icraie-2014)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.6909319>
- Solomou, A. D., Proutsos, N. D., Karetsos, G., & Tsagari, K. (2017). Effects Of Climate Change On Vegetation In Mediterranean Forests: A Review. *International Journal Of Environment, Agriculture And Biotechnology (IJEAB)*, 2(1), 240–247. <https://doi.org/10.22161/ijeab/2.1.31>
- Sonali, P. U., Prasanna, J., Atre, A. A., Pande, C., & Gorantiwar, S. D. (2021). Application Of Ndvi In Vegetation Monitoring Using Sentinel -2 Data For Shrirampur Region Of Maharashtra. *International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences*, 10(1). <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.098>
- Stephens, D., & Diesing, M. (2014). A Comparison Of Supervised Classification Methods For The Prediction Of Substrate Type Using Multibeam Acoustic And Legacy Grain-Size Data. *Plos One*, 9(4), e93950. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093950>
- Taïbi, A. N., Hannani, M. El, Khalki, Y. El, & Ballouche, A. (2019). Les Parcs Agroforestiers D'azilal (Maroc) : Une Construction Paysagère Pluri-Séculaire Et Toujours Vivante. *Revue De Géographie Alpine*, 107–3, 0–17. <https://doi.org/10.4000/rga.6524>
- Tucker, C. J. (1979). Red And Photographic Infrared Linear Combinations For Monitoring Vegetation. *Remote Sensing Of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Underwood, E. C., Viers, J. H., Klausmeyer, K. R., Cox, R. L., & Shaw, M. R. (2009). Threats And Biodiversity In The Mediterranean Biome. *Biodiversity Research*, 188–197. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00518.x>
- United Nations (UN). (2016). Methods Of Estimating Total Population For Current Dates. United Nations, Department Of Social Mairs Population Division. *Population Studies*, 10, 24–30.
- United States Geological Survey (USGS). (2022). *Ndvi, The Foundation For Remote Sensing Phenology | U.S. Geological Survey*.
- Valbuena, P., & Pelayo, M. S. (2014). *Managing Cedar Forests In Morocco's Middle Atlas Mountains* (S. Lapstun (Ed.); Issue August). Food And Agriculture Organization Of The United Nations.
- Zhu, H., & Basir, O. (2005). An Adaptive Fuzzy Evidential Nearest Neighbor Formulation For Classifying Remote Sensing Images. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 43(8), 1874–1889. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.848706>

