

ÍNDICE / INDEX

Prólogo CyG

Ecodinámica de la Superficie Terrestre en un Mundo Cambiante: Sostenibilidad, Cambio Climático y Sociedad. Homenaje a Augusto Pérez Alberti (<i>Environmental Earth Sciences</i> , 2024)	3
---	---

Artículos de Investigación / Research Papers

<i>Silva, P.G.; Pérez-González, A.; Aleixandre Campos, T.</i> La historia de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario. Parte I: AEQUA antes de AEQUA (1973-1990)	7
<i>Cajade-Pascual, D.</i> La investigación paleoambiental a través de los depósitos edafo-sedimentarios: revisión bibliográfica de la costa gallega (NO Península Ibérica).....	25
<i>Mbatyoti, S.; Sumner, P.; Kalumba, A. M.; Owolabi, S. T.; Belle, J. A.</i> Investigating soil erosion vulnerable zones based on clustered geoinformatics approach: a case study of Tyume River Catchment, Eastern Cape, South Africa	47
<i>Mondlhane, C.; Barros-Parada, W.; Mao, L.; Piqué, G.</i> Instream sediment mining in Chilean rivers: review and management proposal.....	75



FECYT-088/2024
Fecha de identificación: 14 de mayo de 2012 (3ª convocatoria)
Válido hasta: 24 de julio de 2025

CUATERNARIO y GEOMORFOLOGÍA



This Journal is also supported by International union for Quaternary Research (INQUA) and International Association of Geomorphologists (IAG)

© SEG, AEQUA



*Derechos de reproducción bajo licencia Creative Commons 3.0.
Se permite su inclusión en repositorios sin ánimo de lucro.*

ISSN: 0214-1744

ISSNe: 2695-8589

Depósito Legal: Z-113-1996

Impresión:

Talleres Editoriales Cometa, S.A.

Ecodinámica de la Superficie Terrestre en un Mundo Cambiante: Sostenibilidad, Cambio Climático y Sociedad. Homenaje a Augusto Pérez Alberti (*Environmental Earth Sciences*, 2024)

*Land Surface Ecodynamics in a Changing
World: Sustainability, Climate Change and
Society. Tribute to Augusto Pérez Alberti
(Environmental Earth Sciences, 2024)*

Horacio García
Profesor Titular de Geografía Física
Universidad de Santiago de Compostela

La revista *Environmental Earth Sciences* publicó recientemente un número dedicado a la figura del Catedrático de Geografía Física de la Universidad de Santiago de Compostela, Augusto Pérez Alberti, bajo el intencionado título “*On dialogue about earth processes and sustainable environment in a changing world: a tribute to the legacy of the landscape traveller Augusto Pérez-Alberti*”. En un total de 54 artículos se recoge buena parte de la sapiencia que Augusto atesora y fue transmitiendo a quienes tuvimos la suerte de compartir aulas y jornadas de campo con él.

The journal *Environmental Earth Sciences* recently published an special issue dedicated to the Professor of Physical Geography at the University of Santiago de Compostela, Augusto Pérez Alberti, under the title “*On dialogue about earth processes and sustainable environment in a changing world: a tribute to the legacy of the landscape traveller Augusto Pérez-Alberti*”. In a total of 54 articles, a good part of the wisdom that Augusto treasures and transmitted to those of us who had the good fortune to share classrooms and field days with him.

La revista *Environmental Earth Sciences* publicó recientemente un número dedicado a la figura del Catedrático de Geografía Física de la Universidad de Santiago de Compostela, Augusto Pérez Alberti. Bajo el intencionado título “*On dialogue about earth processes and sustainable environment in a changing world: a tribute to the legacy of the landscape traveller Augusto Pérez-Alberti*” (ver [aquí](#)), se recoge en un total de 54 artículos buena parte de la sapiencia que Augusto fue atesorando y transmitiendo a quienes tuvimos la suerte de compartir aulas y jornadas de campo con él. El número, editado por Alberto Gomes, Horacio García, Alejandro Gómez-Pazo y Helder Chaminé (Fig. 1), trató de compilar los quehaceres científicos y geográficos que Augusto fue trazando con pluma desde los años 70 en forma de un extenso legado escrito.



Figura 1. Portada del número especial homenaje a Augusto Pérez Alberti (izquierda) e imagen del homenajeado en *Ilha do Pico* (Azores, agosto de 2024) (derecha).

Los números en sí pueden ser fríos, pero también testifican evidencias, y con Augusto Pérez Alberti los números no engañan. Ha sido activo en la docencia y dirección de numerosos estudiantes de doctorado, máster y grado. Es autor o coautor de más de 320 publicaciones en revistas indexadas, capítulos de libros, actas de congresos e informes técnicos. Ha coeditado publicaciones y participado en la edición de números especiales para prestigiosas revistas o series de libros. Fue, además, presidente (y vicepresidente) de la Sociedad Española de Geomorfología.

Lo que subyace tras el número es un investigador y viajero incansable, capaz de estar impartiendo una charla del más alto nivel en un congreso internacional, como estar horas midiendo sedimentos,

cual becario predoctoral se tratase. ¿Es posible ser Catedrático y doctorando al mismo tiempo? Como suele decir Augusto, un pintor nunca se jubila, sigue pintando toda la vida. Un escritor nunca se jubila, sigue escribiendo toda la vida. Un investigador, entonces, nunca se jubila, sigue investigando toda la vida. Y así fue como Augusto se embarcó en una nueva tesis más de 40 años después de la primera. En el año 2025 tendremos un nuevo doctor especializado en suelos. Quizás esta sea la esencia de Augusto, un veterano científico con la ilusión de un “tierno predoc”.

El hecho de un homenaje es en sí mismo un reconocimiento. Pero en este caso creo que podemos afirmar que es también una compensación, un reequilibrio de la balanza, para devolverle al saber lo que el saber nos aportó. El saber de Augusto nos abrió los ojos, nos retiró la miopía para adentrarnos en la comprensión de los procesos terrestres, en particular los procesos glaciares y periglaciares, la dinámica sedimentaria, o la geomorfología costera. Es pertinente afirmar que su aportación ayudó a comprender la dinámica de los procesos que dan forma a los sistemas terrestres como pieza fundamental para proteger y preservar los ecosistemas, los paisajes, los recursos naturales y el bienestar de las comunidades. Como todo saber es un continuo en el que vamos aportando nuestro bagaje, Augusto fue, además, el gran diseminador del saber holístico de su maestro, el profesor a Jean Tricart, quien con gran acierto afirmaba 50 años atrás que “debemos, ante todo, observar y razonar objetivamente y tener siempre mucho cuidado de comparar nuestros resultados con los de otras disciplinas científicas, pues la naturaleza misma es un todo unificado”.

Los artículos que componen el monográfico que aquí se presenta se adentran, desde diferentes disciplinas y enfoques, en el hecho de la superficie de la Tierra como un espacio complejo que sustenta todas las formas de vida y proporciona el “territorio común” para las actividades humanas. Las interacciones dinámicas entre la atmósfera, el agua, la biota, la tectónica, la geología y la sociedad crean paisajes únicos e interconectados entre sí y con los cambios climáticos y de usos del suelo. Comprender estos procesos resulta crucial para promover y gestionar un desarrollo sostenible y proteger los sistemas naturales y culturales.

Hojeando la colección de artículos el lector descubrirá una amplia gama de trabajos centrados en la interrelación de la geografía física y humana, la climatología, la geomorfología, la tectónica, la geoquímica, la hidrogeomorfología, la hidrogeología, la geología aplicada, la teledetección y los SIG, los riesgos naturales y las ciencias ambientales en general. Autores y contribuciones abarcan regiones de todas las partes del mundo, lo que ilustra la importancia del tema: África (Argelia, Camerún, Egipto, Sudáfrica), América (Brasil, Canadá, Chile, Ecuador, México), Oriente Medio (Irán, Arabia Saudí, Turquía), Asia (China, Bharat Ganarajya / India, Pakistán) y Europa (Francia, Italia, Noruega, Portugal y España, incluidas las Islas Baleares y las Islas Canarias). Los artículos publicados muestran, además, diferentes procedimientos, enfoques y aplicaciones, pudiéndose organizar, de un modo general, tal y como sigue: (i) artículos centrados en la dinámica de los procesos sedimentarios y geomorfológicos costeros; (ii) artículos relacionados con la climatología y estudios árticos y subárticos, procesos glaciares y dinámica fluvial; (iii) artículos sobre recursos naturales, geoecología, estudios paleoambientales y geoambientales; (iv) artículos orientados a la teledetección y geotecnologías; (v) contribuciones sobre peligros geológicos, geomorfológicos e hidrológicos; y (vi) artículos que abordan la evaluación de las aguas subterráneas y el cambio climático. A su vez, dentro de cada una de estas agrupaciones temáticas también hay una notable diversidad interna que sorprenderá al lector.

El geógrafo, cuando viaja, trabaja

O viaxeiro Augusto fue mentor e inspirador de varias generaciones de geomorfólogos, geógrafos físicos, geólogos, arqueólogos, ingenieros, urbanistas y científicos ambientales dentro y fuera de la Península Ibérica. También fue disruptivo y pensó de manera innovadora en cuanto a la conceptualización de los procesos terrestres, sin perder el foco en la ciencia ni despreciar el saber local y de la observación. **Ante un mundo cambiante a una velocidad cada vez mayor, y auspiciado por las presiones sociales que engendran riesgos potenciales, es fundamental invertir esfuerzos en entornos sostenibles y en la mejora de la comprensión de los procesos que gobiernan la superficie terrestre.** Ese enfoque garantiza una comprensión integral de la conservación de los ecosistemas y la dinámica de las comunidades, lo que permite diseñar mejores acciones para preservar la integridad del hábitat social. El reto que tenemos por delante como sociedad requiere un ingente esfuerzo de colaboración científica interdisciplinaria, tecnológica y de enfoques de gobernanza adaptativos para garantizar roturas de paradigmas que creen nuevos escenarios y resiliencia a largo plazo.

La rapidez de los tiempos, las nuevas tecnologías o las cabezas agachadas mirando para pantallas y dominando aparatajes sicodélicos, está desconectando la ciencia de la observación, del “pateo”, de la comprensión global y local como si de un mismo ente se tratase. Augusto es, tal vez, uno de los últimos vástagos de esta escuela de investigadores que aprendieron a base de pasos y la agudeza de los sentidos. También, quizás, de mucha intuición y un espíritu de emprendimiento y avance en un saber profundo que parece desvanecerse en estos nuevos tiempos de la eferescencia. Solo bajo un conocimiento sosegado y enraizado se pueden explicar con lucidez los procesos complejos e interconectados que afectan al paisaje y el medio ambiente, hecho esencial para comprenderlos y predecir su evolución, variabilidad y cambios. Augusto fue, y es, en este sentido, uno de sus grandes exponentes.



**La historia de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario.
Parte I: AEQUA antes de AEQUA (1973 – 1990)**

*The History of the Spanish Society for Quaternary Research.
Part I: AEQUA before AEQUA (1973-1990)*

Silva, P.G. ⁽¹⁾; Pérez-González, A. ⁽²⁾; Aleixandre Campos, T. ⁽³⁾

(1) Departamento, Geología, Universidad de Salamanca. Escuela Politécnica Superior de Ávila.
05003-Ávila pgsilva@usal.es

(2) Instituto de la Evolución en África (IDEA), Universidad de Alcalá de Henares, Covarrubias 36,
28010. Madrid, España.

(3) Centro de Ciencias Medioambientales, CSIC. Serrano s/n 28040. Madrid, España

Resumen

Este trabajo es el primero de una trilogía que pretende resumir la historia de los estudios de Cuaternario en España en relación con la creación de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, AEQUA. Esta primera entrega parte del Congreso Internacional INQUA celebrado en nuestro país en 1957. Posteriormente se centra en la creación del Grupo Español de Trabajo de Cuaternario (GETC), germen de la Asociación, las primeras reuniones científicas y los primeros vínculos de este grupo de cuaternaristas con la International Union for Quaternary Research (INQUA). Se repasan las primeras juntas directivas hasta la constitución de AEQUA como Sociedad Científica propiamente dicha en 1985. El posterior análisis continúa con los primeros congresos nacionales organizados por AEQUA y la celebración de las dos primeras Reuniones de Cuaternario Ibérico (REQUI) juntamente con los cuaternaristas portugueses. Finalizamos con un amplio resumen de la 2ª Reunión de Cuaternario Ibérico celebrada en Madrid en 1989, poniendo en relieve el importante papel que jugaron en la creación de AEQUA personas como Emiliano Aguirre, Alfredo Pérez-González y Trinidad Aleixandre.

Palabras clave: Cuaternario, Historia, AEQUA, INQUA, España.

Abstract

This is the first of a trilogy that aims to summarize the history of Quaternary studies in Spain in relation to the creation of the Spanish Society for Quaternary Research, AEQUA. This first part begins with the INQUA Inter-



national Congress held in Spain in 1957. It then focuses on the creation of the Spanish Quaternary Working Group (GETC), the seed of AEQUA, the first scientific meetings and the first links of this group of Quaternary scientists with the International Union for Quaternary Research (INQUA). The first AEQUA executive boards of GETC and AEQUA are reviewed until the foundation of our scientific society in 1985. The subsequent analysis continues with the firsts AEQUA national meetings and the celebration of the first two Iberian Quaternary Congresses (REQUI) together with the Portuguese colleagues. We conclude with a comprehensive summary of the 2nd Iberian Quaternary Meeting held in Madrid in 1989, highlighting the important role played in the foundation of AEQUA by people such as Emiliano Aguirre, Alfredo Pérez-González and Trinidad Aleixandre.

Key words: Quaternary, History, AEQUA, INQUA, Spain.

1. Introducción

En el año 2025 AEQUA cumplirá 40 años desde su creación como sociedad científica y con tal motivo nos hemos propuesto publicar una serie de tres artículos rememorando la historia de nuestra asociación y la de los inicios de los estudios del periodo Cuaternario en nuestro país. Con motivo de la celebración de la 2^a Reunión de Cuaternario Ibérico en Madrid, Trinidad Aleixandre y Alfredo Pérez-González escribieron un prólogo sobre la historia de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario entre los años 1973 y 1992 (Aleixandre y Pérez-González, 1989). El presente escrito está basado prácticamente en su totalidad en lo glosado en aquel prólogo.

2. Los inicios: El V Congreso Internacional INQUA de 1957 (Madrid-Barcelona)

En España existe una larga tradición de estudios en geología, geomorfología y paleontología del periodo Cuaternario. A mediados del Siglo XIX, el hallazgo de restos fósiles de elefantes e instrumentos paleolíticos en los Altos de San Isidro del Valle del Manzanares (cementerio de San Isidro) convirtieron a la región Madrid en lugar de interés internacional, donde acudieron numerosos investigadores atraídos por la riqueza faunística y prehistórica de los antiguos areneros de San Isidro. Entre esos investigadores cabe destacar Hugo Obermaier (1877-1946) y Eduardo



Figura 1. El V Congreso INQUA, celebrado en España 1957, adoptó como logo la pintura prehistórica de un bisonte de la Cueva de Altamira, en Santander. Reproducción en Color P.G. Silva.

Figure 1. The V INQUA Congress, held in Spain 1957, used as its logo a prehistoric painting of a bison from the Altamira Cave in Santander. Colour reprint by P.G. Silva.

Hernández-Pacheco (1872-1965), que realizan importantes investigaciones en la zona y propagan el interés de los estudios de Cuaternario por toda la geografía española. La guerra civil española (1936-1939) y la siguiente dictadura suponen un importante parón en las investigaciones de todo tipo y, cómo no, también en las geológicas. Tras este letargo, en el año 1957 se celebró en Madrid-Barcelona el V Congreso Internacional de la Unión Internacional para el Estudio del Cuaternario (INQUA). El Congreso estuvo presidido por el Prof. José María Albareda Herrera (1902-1966), doctor en farmacia, químico agrónomo-

mo, sacerdote e importante miembro del Opus Dei, que ocupó la Secretaría General del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) durante gran parte de la dictadura franquista hasta su muerte en 1966 (Mailet, 2009). Posiblemente, este congreso significó el arranque moderno de las investigaciones cuaternarias de nuestro país (Aleixandre y Pérez González, 1989). En el congreso INQUA participaron importantes investigadores que posteriormente impulsarían el estudio del periodo Cuaternario en nuestro país entre otros, Oriol Riba i Andreu (Barcelona), Carlos Vidal Box (Madrid), Ramón Margalef (Barcelona), Joaquín Gómez de Llarena (Madrid), Isidro Parga Pondal (A Coruña), Josefina Pérez Mateos (Madrid), Francisco Hernández-Pacheco (Madrid), Salvador Mensua Fernández (Zaragoza), Luis García Sainz (Barcelona), Joaquín González Echegaray (Santander), Noel Llopis Lladó (Oviedo), Francisco Jordá Cerdá (Salamanca), Carlos Roquero de Laburu (Valencia-Madrid), Antonio Guerra Delgado (Madrid), Domingo Fletcher Valls (Valencia), Miquel Crusafont (Barcelona) y su pupilo, por entonces un joven sacerdote Jesuita llamado Emiliano Aguirre Enríquez (Madrid). El por entonces joven Dr. Aguirre, especializado en paleontología de vertebrados del Cuaternario, fue el verdadero impulsor para que el congreso INQUA se celebrara en España (Bardají et al., 2022). Durante el evento se hacen interesantes excursiones a yacimientos paleolíticos de la Cordillera Cantábrica (Asturias), Valle del Manzanares (Madrid), Cova Negra (Valencia) y, cómo no, Altamira (Santander) uno de cuyos famosos bisontes fue elegido logo del congreso INQUA de 1957 (Figs. 1 y 2). Es importante indicar que es a partir de este congreso internacional cuando INQUA instaura los logos como imagen de los sucesivos congresos internacionales (Smalley, 2011).

A partir de entonces comienza la brillante carrera de Emiliano Aguirre en el impulso de los estudios de Cuaternario en nuestro país, y

prueba de ello es su contribución al influyente libro “La Evolución” (Crusafont, Meléndez y Aguirre, 1966), un volumen de gran trascendencia para el desarrollo de la paleontología humana en España (Rosas, 2022) y de forma casi inmediata la reimpresión de las actas del V Congreso INQUA de 1957 (Aguirre, 1969). Distintos ejemplares de esta edición se conservan en la sede de Recoletos de la Biblioteca Nacional y en la del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid. De forma casi paralela, Emiliano Aguirre se involucra crecientemente en las actividades de INQUA, y comienza a dar clases de Paleontología en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid. En 1972 promueve la creación del Grupo Español de Trabajo del Cuaternario y en 1974 obtiene la plaza de investigador en el Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid (CSIC), deja

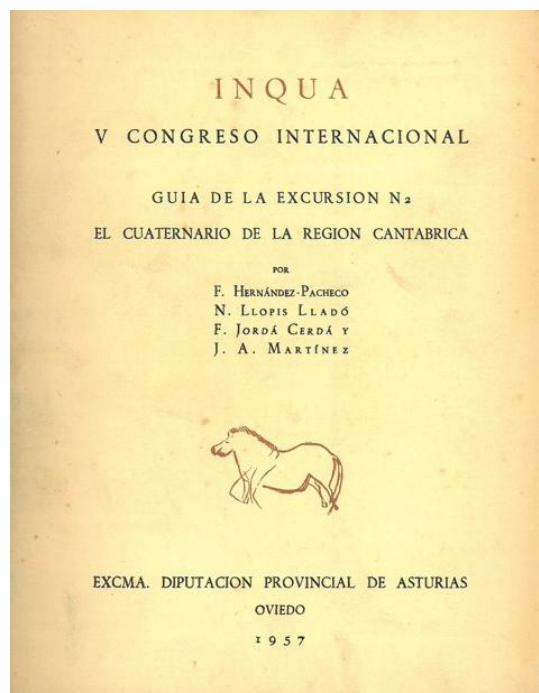


Figura 2. Portada de la Guía de Campo de la Excursión realizada a la Cordillera Cantábrica durante el V Congreso Internacional INQUA Celebrado en España en 1957.

Figure 2. Front Cover of the guide from the field trip to the Cantabrian Cordillera during the V INQUA International Congress held in Spain in 1957.

el sacerdocio y contrae matrimonio (Rosas, 2022). Desde el Museo Nacional de Ciencias Naturales promueve distintas tesis doctorales sobre temáticas de paleontología, geología y geomorfología del Cuaternario. Entre sus primeros pupilos más destacados promotores de AEQUA, se encontraban Nieves López, María Teresa Alberdi, Manuel Hoyos Gómez, Alfonso Ruiz Bustos, Eloy Molina, Margarita Díaz Molina, Caridad Zazo, Alfredo Pérez-González, etc. quienes a su vez han dado lugar a un nutrido linaje de cuaternaristas españoles (Silva et al., 2009).

3. El Grupo Español de Trabajo del Cuaternario (GETC)

A propuesta de Alfredo Pérez-González, en 1972 se reúne un grupo de científicos que trabajan sobre diversos aspectos del Cuaternario en España. En esa reunión, presidida por el Prof. Emiliano Aguirre, se decide la creación del *Grupo Español de Trabajo del Cuaternario (GETC)* bajo el patrocinio de la Asociación de Geólogos Españoles (AGE), germen del Colegio Oficial de Geólogos, se nombra una junta provisional hasta que se celebre una primera asamblea general y se marcan dos objetivos principales:

- 1) Gestionar la incorporación de España a la *INTERNATIONAL UNION FOR QUATERNARY RESEARCH (INQUA)* como miembro de pleno derecho.
- 2) Organizar, en 1973, la primera *REUNIÓN NACIONAL DEL GRUPO ESPAÑOL DE TRABAJO DEL CUATERNARIO (GETC)* en Madrid, promovida por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

Ambos objetivos se cumplieron y, tras las gestiones del presidente del GETC (Emiliano Aguirre), se logra que el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) quede incorporado como miembro plenario de INQUA

representando a España. El CSIC nombra un Comité Español del Cuaternario, presidido por el Prof. Aguirre, que tiene como misión además de representar a España en el organismo científico internacional, la de fomentar y apoyar las actividades del grupo a nivel nacional e internacional.

Del 8 al 11 de octubre de 1973 se celebra en Madrid, con sede en el Instituto de Edafología y Biología Vegetal del CSIC, la *I REUNIÓN NACIONAL DEL GRUPO ESPAÑOL DE TRABAJO DEL CUATERNARIO*, organizada por Alfredo Pérez-González (Universidad Complutense de Madrid, UCM), Juan Gallardo y Trinidad Aleixandre (Instituto de Edafología y Biología Vegetal, CSIC), con la colaboración de otros científicos miembros del GETC. Esta reunión tuvo un gran éxito, asistieron 80 especialistas; geólogos, edafólogos, sedimentólogos, geomorfólogos, geógrafos, paleontólogos y prehistoriadores. Se presentaron 14 comunicaciones y se realizaron dos excursiones: una al valle alto del Jarama y otra al valle del Henares-Jarama donde se estudiaron las formaciones cuaternarias y perfiles edáficos asociados a los sistemas de terrazas fluviales de ambos valles. Se elaboraron guías de campo para ambas excursiones con la cartografía de la zona y los resultados de los análisis realizados sobre los materiales muestreados (Aleixandre y Pérez-González, 1989). Coincidiendo con la reunión se celebra la asamblea general donde se elige a la *primera Junta Directiva del Grupo de trabajo*, cuyos componentes se detallan en la tabla 1.

En 1974 se celebra el *1^{er} Coursillo Hispanofrancés del Cuaternario* en Madrid, patrocinado por la Embajada de Francia y el Comité Español del Cuaternario, en el que participaron numerosos asociados al GETC. También, desde este año, se empiezan a publicar boletines que recogen noticias referentes a la marcha y organización del Grupo de Trabajo; celebración de congresos y reuniones científicas.

Tabla 1: Composición de la primera Junta Directiva del Grupo Español de Trabajo del Cuaternario (1973-1977)
 Table 1: Composition of the first Executive Board of the Spanish Quaternary Working Group (1973-1977)

<p>Presidente: Emiliano Aguirre Enríquez. Museo Nacional Ciencias Naturales, CSIC (Madrid).</p> <p>Vicepresidente: Trinidad Aleixandre Campos. Instituto de Edafología y Biología Vegetal, CSIC (Madrid).</p> <p>Secretario: Juan Gallardo Díaz. Instituto de Edafología y Biología Vegetal, CSIC (Madrid).</p> <p>Tesorero: Óscar Miguel de Lera. Instituto de Edafología y Biología Vegetal, CSIC (Madrid).</p> <p>Vocales: Antonio Guerra Delgado. Dpto. Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid (UAM).</p> <p>Carlos Enrique Martí Bono. Instituto Pirenaico de Ecología (IPE), CSIC, Jaca (Huesca).</p> <p>Eduardo Martínez de Pisón. Dpto. Geología y Geoquímica Universidad Autónoma de Madrid (UAM).</p> <p>Alfredo Pérez-González. Facultad de Geología, Universidad Complutense de Madrid (UCM).</p> <p>José Quirantes Puertas. Estación Experimental Zaidín, CSIC, Almería.</p> <p>Manuel Santonja Gómez. Museo Arqueológico de Salamanca.</p>

ficas; líneas de investigación, etc. A la vez, se empiezan a elaborar los Estatutos del Grupo y se editan las *Actas de la I Reunión Nacional de Cuaternario*, que incluyen los trabajos presentados más las guías de las salidas de campo editadas por *T. Aleixandre, J. Gallardo y A. Pérez-González*. Se publican en la serie “*Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario*” vol. 2, Sección de Paleontología de Vertebrados y Humana, del Instituto Lucas Mallada del CSIC (Madrid). Este volumen constituye la primera publicación promocionada y editada por el grupo de cuaternaristas que posteriormente se nuclearon en AEQUA.

Del 15 al 20 de septiembre de 1975 tiene lugar la II REUNIÓN DEL GRUPO ESPAÑOL DE TRABAJO DEL CUATERNARIO en Jaca (Huesca), bajo el patrocinio del Instituto de Estudios Pirenaicos, CSIC, organizada por *Carlos E. Martí Bono*. El tema de la reunión fue “*Depósitos glaciares y fluvio-glaciares*”. Asistieron unas 100 personas; se presentaron 42 comunicaciones y se realizaron distintas excursiones a los valles de los ríos Gállego, Aragón y Aragón Subordán, con objeto de estudiar la

distribución geográfica y la cronología de las formaciones fluviales, fluvio-glaciares y glaciares de dichos valles. A finales de 1975, se editan las *Actas de la II Reunión* en el vol. 6 de la serie “*Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario*”, Sección de Paleontología de Vertebrados y Humana (I.L.M.), CSIC, corriendo su edición y revisión a cargo de María Teresa Alberdi, Juan Gallardo, Trinidad Aleixandre y Manuel Santonja.

Al incorporarse nuevos socios de toda España al GETC y aumentar el número de asociados en las distintas regiones surge el *primer Grupo de Trabajo* en Galicia. *El Grupo de Trabajo Gallego* agrupó a los cuaternaristas de Galicia, siendo su primer coordinador *Juan Ramón Vidal Romaní*, del *Laboratorio Xeolóxico de Laxe (A Coruña)*. Este grupo desarrolla una actividad científica con salidas de campo y trabajos en equipo. Su coordinador se ocupaba de editar los Boletines del Grupo de Trabajo Español, labor que con anterioridad recaía en otros miembros de la junta directiva. Posteriormente tras la creación de AEQUA en 1985 el Grupo de Trabajo Gallego desapareció.

Durante los días 19 al 24 de septiembre de 1977 se celebra la *III REUNIÓN DEL GRUPO ESPAÑOL DE TRABAJO DEL CUATERNARIO*, organizada por el Prof. Salvador Mensua y la Dra. María Jesús Ibáñez del departamento de Geografía de la Facultad de Filosofía y Letras de la *Universidad de Zaragoza*. La Reunión trata sobre “*El Cuaternario en medios Semiáridos*”. La participación fue de 120 asistentes; se presentaron 30 comunicaciones y se realizaron tres salidas de campo para visitar y discutir sobre el terreno distintos aspectos. La primera sobre “El Piedemonte Ibérico en las comarcas de la Almunia y Cariñena y el corte de la Depresión del Ebro en su sector meridional”. La segunda al “Valle inferior del Gállego y piedemonte meridional de la Sierra de Alcubierre”. Una tercera se dedicó a “La Plataforma de El Castellar y la Cuenca presomontana de las Cinco Villas”. Las *Actas de la III Reunión* preparadas por J. Muñoz, T. Aleixandre y J. Gallardo se editan en 1979, por el Instituto de Geografía Aplicada del CSIC (Zaragoza) y recogen 24 trabajos y las guías de las excursiones.

En septiembre de 1979, del 23 al 30, se celebra la *IV REUNIÓN NACIONAL DEL GRUPO ESPAÑOL DE TRABAJO DEL CUATERNARIO*, en *Banyoles (Girona)*, organizada por los doctores Ramón Julià y David Serrat i Congost con la colaboración de Miguel Ángel Marqués, Andrés Mir y Francesc Gallart, todos ellos de la Facultad de Ciencias Geológicas de la *Universidad de Barcelona*. La temática de la Reunión se centra en la “*Interpretación de los ambientes y procesos cuaternarios: Metodología, problemática y resultados*”. Se inscribieron unos 100 participantes y se realizaron excursiones para observar las formaciones cuaternarias debidas a la morfogénesis glacial, fluvio-glacial, periglacial y fluvial de la cuenca alta del Valle del Ter. Se visitó también la cuenca lacustre de Banyoles-Besalú para conocer la génesis del lago y de las formaciones carbonatadas asociadas. Una tercera excursión tuvo como objeto el estudio del Cua-

ternario en la zona del Penedés: sus suelos, abanicos aluviales y terrazas marinas del Bajo Ebro. A los participantes se les entregaron las Actas con 21 trabajos y las guías de las excursiones, publicadas por la Universidad de Barcelona y editadas por los organizadores.

Dentro de este periodo (tardofranquismo), resulta significativo destacar lo difícil que era en España la creación de movimientos asociativos (políticos, sociales, científicos, etc.). En este sentido, es importante reseñar que la comunidad cuaternarista fue una de las primeras asociaciones científicas en constituirse al amparo de la recién formada Asociación de Geólogos Españoles, que ya funcionaba con el visado oficial del antiguo Ministerio de Gobernación desde 1968 con el objetivo de crear un colegio profesional (*Leguey Jiménez, 2003*). El *Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG)* no se creó hasta el 26 de diciembre de 1978 cuando se aprobó la ley orgánica correspondiente por las primeras cortes constituyentes, dos días más tarde se aprobaría la actual Constitución Española. El ICOG tuvo su primera reunión nacional en la Universidad de Salamanca en 1979. Pasarían todavía bastantes años para que, bajo el amparo de la Ley Nacional de Asociaciones de la democracia española de 1985, se crearan la Sociedad Geológica (SGE) y la Sociedad Geomorfológica de España (SEG). En esa misma tirada se oficializó AEQUA como sociedad científica en el Registro Nacional de Asociaciones del Ministerio del Interior (*Aleixandre y Pérez-González, 1989*).

4. El Problema del Límite Neógeno-Cuaternario

Desde 1979 Emiliano Aguirre preside la Comisión de INQUA sobre el Límite Plio - Pleistoceno (*Plio-Pleistocene Boundary Commission*). Ya desde 1973 la comisión internacional de estratigrafía de la IUGS genera un grupo de trabajo sobre el “*Límite Neógeno-Cuaternario*” a

la vez que la UNESCO lanza un Proyecto del Programa Internacional de Correlación Geológica (IGCP 41) sobre la misma temática en 1974 (Aguirre y Passini, 1985). Desde la Comisión Internacional de Estratigrafía (ICS - IUGS) había surgido y tomaba vigor un movimiento tendente a minimizar la categoría estratigráfica del término “Cuaternario”, sugiriendo su supresión como periodo en la escala de tiempos geológica, así como el abandono formal de su empleo en la escala cronoestratigráfica internacional (Aguirre, 1983). En respuesta a este movimiento de la ICS, durante el X Congreso Internacional INQUA celebrado en Birmingham en 1979, se crea la comisión sobre el límite Plio-Pleistoceno, con Emiliano Aguirre (España) como Presidente y Gregorio Passini (Italia) como Secretario (Aguirre y Passini, 1985).

A raíz de la polémica, durante 1979, además de la *IV REUNIÓN NACIONAL DE CUATERNARIO*, se celebró la *PRIMERA REUNIÓN DEL GRUPO ESPAÑOL DEL LÍMITE NEÓGENO-CUATERNARIO* (Sección del GETC) en Madrid. Tuvo como objeto el explorar las posibilidades de investigación del paleomagnetismo de algunas series Plio-Pleistocenas continentales y marinas con potencial paleontológico. Actuó como *coordinador Emiliano Aguirre*, con la participación del micropaleontólogo *Jaime de Porta* (Barcelona, UB), el estratígrafo *Juan Antonio Vera* (Granada, UGR) y los geólogos cuaternaristas *Alfredo Pérez-González* y *Caridad Zazo* (Madrid, UCM). Con motivo de la reunión se publica un *Vol. Especial de la Serie Trabajos Neógeno-Cuaternario (Vol. nº 9)* editado por *C. Zazo* y *E. Aguirre*, con los trabajos más destacados de la misma (Fig. 3).

En 1982 se celebra el *XII CONGRESO INTERNACIONAL DE INQUA* en el Moscú de la antigua URSS, siendo a su vez el 50 aniversario del segundo congreso INQUA celebrado en 1932 en Leningrado-Moscú antes de la II Guerra Mundial (Smalley, 2011). En ese congreso se



Figura 3. Recreación portada del Vol. 9 de la Serie Trabajos sobre Neógeno Cuaternario, donde se publicaron las Actas de la Primera Reunión del Grupo de Trabajo AEQUA sobre EL Límite Neógeno-Cuaternario. P.G. Silva.

Figure 3. Recreation of the cover of Vol. 9 of the series Trabajos sobre Neógeno Cuaternario, where the Proceedings of the First Meeting of the AEQUA Working Group on the Neogene-Quaternary Boundary were published. P.G. Silva.

elige nuevo presidente al *Prof. Hugues Faure* (Francia) y se produce la reestructuración de INQUA con la generación de las nuevas comisiones que, de una forma u otra, se han prolongado hasta la actualidad: *Procesos Terrestres, Líneas de Costa, Neotectónica, Paleontología Humana, Estratigrafía del Cuaternario, Límite Neógeno-Cuaternario*, etc. También en ese congreso se formaliza la participación “*per se*” de los comités nacionales de Cuaternario. Es la primera vez que el Comité Español de Cuaternario concurre oficialmente a un congreso internacional, estando presidido por el *Prof. Emiliano Aguirre*, quien presidía ya desde 1977 la comisión INQUA del límite Neógeno-Cuaternario. La presión de la comu-

nidad estratigráfica internacional de la ICS, que ya había acabado antes con el término “Terciario”, metía ahora presión para borrar el Cuaternario de la escala cronoestratigráfica global. Esta propuesta en contra del Cuaternario no salió adelante. Lo mismo ocurriría más adelante cuando, en 2009, el Periodo Cuaternario volvió a crecer una vez más tras una nueva acometida de la ICS para acabar con el Cuaternario (Walker et al., 2009).

En 1983 con motivo de la VI REUNIÓN NACIONAL DEL GRUPO ESPAÑOL DE TRABAJO DEL CUATERNARIO (Santiago – Vigo), Emilia-no Aguirre promueve una charla y emite una circular denominada “El Cuaternario a debate” que posteriormente es publicada en los Cuadernos del Laboratorio Xeológico de Laxe (Aguirre, 1983). La misiva era un alegato en defensa del término “Cuaternario”, pero a la vez un triste relato de lo que parecía iba a acontecer a la vista de diferentes votaciones entre el grupo de trabajo de Neógeno-Cuaternario de la Comisión Internacional de Estratigrafía y del Proyecto IGCP Nº 41. En septiembre de 1983 parecía inevitable que el término “Cuaternario” acabara por decaer y desaparecer de la escala cronoestratigráfica internacional. Pero, de igual modo, la misiva indicaba que sería conveniente, y en cierto modo inevitable, que el término Cuaternario siguiera en uso, aunque fuera de manera informal como fuerza aglutinante para el conjunto de disciplinas y para la diversidad de problemas entreverados, que seguirán ocupando por muchos años el interés y el tiempo de miles de cuaternaristas, que ya lo eran de hecho (Aguirre, 1983). En la misiva Aguirre incluso se atrevió a apuntar que quizá en un futuro surgiría con fuerza un nuevo termino que él denominó “Antropogeno” que sustituiría al Cuaternario, por entonces en claro proceso de extinción cronoestratigráfica. En la actualidad, todos estamos familiarizados con el término “Antropoceno” y con la polémica y rechazo que ha suscitado de nuevo en

la comunidad internacional de estratígrafos (Cearreta, 2009). Por el contrario, en aquel entonces la Comisión de INQUA no cejó en su trabajo y tras varias complejas reuniones y votaciones conjuntas entre diferentes proyectos IGCP sobre el límite Neógeno-Cuaternario y la subcomisión de INQUA, la Comisión Internacional de Estratigrafía de la IUGS decide apoyar la continuidad del término Cuaternario como periodo geológico y proponer la sección de Vrica (Calabria, Italia) como el “Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSP)” para el límite Plio-Pleistoceno en 1,88 Ma. Todo ello queda finalmente refrendado en 1985 y los resultados publicados en el vol. 82 de la Revista Episodes (Aguirre y Pasini, 1985).

A partir de entonces, se creó la “Subcomisión de Estratigrafía del Cuaternario” de la ICS (IUGS) asociada a INQUA, que desde entonces ha tenido que librar nuevas batallas con los estratígrafos del Neógeno. En el año 2006 INQUA publica una carta abierta sobre el estatus del Periodo Cuaternario y su límite con el Neógeno en su newsletter *Quaternary Perspectives* (Calgue et al., 2006) dejando clara la inequívoca posición de INQUA sobre el tema. A partir de este momento se llega a un inevitable acuerdo entre INQUA y la ICS publicado en el informe anual de la ICS del año 2006. En él se indica que la Era Cenozoica queda formalmente subdividida en tres periodos: Paleógeno, Neógeno y Cuaternario. La nueva escala cronoestratigráfica sitúa además la base del Cuaternario en el inicio del piso Gelasense (2,58 Ma) que anteriormente constituía el último piso del Plioceno. Así, la nueva base del Cuaternario pasa de los 1,88 Ma de Aguirre y Pasini (1985) a los nuevos 2,58 Ma. Este coincide con el inicio de estadio isotópico marino MIS103, cercano a la inversión Gauss/Matuyama (Calgue et al., 2006). Todo ello y los GSSP correspondientes al Pleistoceno Inferior quedan ratificados en el año 2009 (Walker et al., 2009). Aunque en poste-

rios entregas daremos más detalles sobre este tema, quede esto aquí para testimoniar el gran esfuerzo de la comunidad cuaternarista internacional (y también española) para que el Cuaternario no quede engullido por el Neógeno.

5. Los años ochenta y el comienzo de las Reuniones de Cuaternario Ibérico

Entre finales de los 70 e inicios de los 80 se terminan y defienden muchas de las primeras tesis promovidas por Emiliano Aguirre sobre distintas temáticas del Cuaternario. Pasa lo mismo en diferentes universidades e instituciones científicas dirigidas por los miembros del grupo de trabajo más veteranos. Los primeros cuaternaristas que impulsaron el GETC se convierten en doctores. Su nuevo estatus provoca un impulso de los estudios del Cuaternario en nuestro país. A lo largo de la década de 1980 se multiplican los proyectos de investigación y comienza a nutrirse una nueva generación de jóvenes cuaternaristas que tienen como padre científico a Emiliano Aguirre y otros ilustres veteranos. No obstante, Aguirre sigue con su incansable labor investigadora, ahora más centrada en los yacimientos de Atapuerca, y sigue apadrinando nuevas tesis sobre paleontología y paleoantropología humana desde el *Museo Nacional de Ciencias Naturales* (Silva et al., 2009; Rosas, 2022).

En 1981 se celebra la *V REUNIÓN NACIONAL DEL GRUPO ESPAÑOL DE TRABAJO DEL CUATERNARIO*, del 21 al 27 de septiembre en Sevilla. La organización corrió a cargo de los *Prof. José Manuel Rubio, Fernando Díaz del Olmo y Daniel Márquez*, del Departamento de Geografía de la *Universidad de Sevilla*. Asistieron 100 participantes y el tema de la reunión fue: “*El Cuaternario continental y su tránsito a las formaciones marinas*”. El objetivo de las excursiones fue conocer la génesis y morfodinámica del Cuaternario al sur de Sierra Morena, entre los valles del Guadiana (oeste) y del

Guadalquivir (este) y establecer, en lo posible, una cronología base de fenómenos geomorfológicos, para lo cual se recorrieron Sierra Morena, el Aljarafe, las marismas y terrazas del valle del Guadalquivir, así como los litorales de Huelva y Cádiz. Las actas, coordinadas por F. Díaz del Olmo, D. Márquez y J.M. Rubio, fueron editadas por la Universidad de Sevilla y recogen 24 trabajos y las guías de las excursiones realizadas.

En 1982 se constituye el *Grupo de Trabajo de Castilla-León y La Mancha*, que agrupaba a todos los cuaternaristas de la región del centro peninsular mayormente centrados en los trabajos sobre Cuaternario en los valles de las cuencas del Tajo y Duero y, en especial, sobre las primeras excavaciones de los yacimientos de la sierra de Atapuerca. Su primer presidente fue el Doctor *D. Manuel Hoyos Gómez*, geólogo e investigador del Museo Nacional de Ciencias Naturales de Madrid (CSIC).

El año 1983 representa un año muy importante en los estudios de Cuaternario en la península ibérica, se consolida la incorporación progresiva de investigadores portugueses a las reuniones nacionales de Cuaternario, así como las colaboraciones entre investigadores de ambos países. Esto se produce como consecuencia de la celebración de una reunión conjunta entre cuaternaristas portugueses y gallegos mantenida en la Universidad de Braga (Portugal). En esa reunión se sentaron las bases de un proyecto común para “*El estudio de la zona límite entre Galicia y zona Norte de Portugal*”, además de promover la realización de reuniones científicas hispano-portuguesas conjuntas y fomentar la asistencia de cuaternaristas de ambos países a los Congresos internacionales INQUA.

Del 19 al 24 de *septiembre de 1983* se celebra la *VI REUNIÓN NACIONAL DEL GRUPO ESPAÑOL DE TRABAJO DEL CUATERNARIO* en Galicia con doble sede en Santiago de Compostela y Vigo. Su organización corrió a car-

go de *Juan Ramón Vidal Romaní* (Laboratorio Xeolóxico de Laxe) y *Federico Vilas* (Colegio Universitario de Vigo). Se inscribieron 150 participantes y se presentaron 30 comunicaciones. Todas ellas quedaron recogidas en las actas editadas en el vol. 5 de la colección *Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, de cuya preparación y edición se encargaron los organizadores. Se realizó una excursión pre-reunión organizada conjuntamente con los colegas portugueses en la que se visitó la zona del glaciario galaico-portugués de lo que hoy es el *Parque Natural transfronterizo Xurés-Gerês*. Durante la reunión se efectuaron cuatro salidas de campo para discutir sobre el terreno problemas relacionados con: 1) El límite Neógeno-Cuaternario; 2) El origen y evolución de las rías de Muros y Noya; 3) Los procesos actuales de la ría de Vigo; y 4) Los yacimientos prehistóricos de Campo Lameiro. Se editaron individualmente las guías de campo de cada una de las excursiones.

Durante la Reunión del GETC en 1983, el *Dr. Miguel Ramos*, del Instituto de Investigación Científica Tropical Portugués (Lisboa) y *presidente del Grupo de Trabalho Portugues para o Estudo do Quaternário (GTPEQ)*, presentó la propuesta de reunir en Lisboa a los cuaternaristas ibéricos. Esta propuesta cristalizaría en la celebración de la *1ª REUNIÓN NACIONAL DE CUATERNARIO IBÉRICO (REQUI)*, que tuvo lugar en Lisboa del 2 al 6 de septiembre de 1985, con asistencia de 146 participantes. En esta reunión fueron nombrados presidentes de honor los profesores *Lluis Solé i Sabarís* (España) y *Orlando Ribeiro* (Portugal). La comisión organizadora estaba formada por: el *Dr. Miguel Ramos* (Lisboa) como Secretario General y seis vocales, los doctores *Filomena Diniz* (Universidad de Lisboa) *Suzanne Daveau* (Centro Estudios Geográficos Lisboa), y *Georges Zbyszewski* (Servicio Geológico de Portugal) por parte portuguesa, mientras que por parte española formaron parte de la comisión los doctores *David Serrat* (Universidad de Bar-

celona), *Federico Vilas* (Colegio Universitario de Vigo) y *Caridad Zazo* (Universidad Complutense de Madrid). Se nombró, asimismo, una comisión científica conformada por quince investigadores portugueses y españoles. La sesión de apertura estuvo presidida por el secretario de Estado adjunto del Ministerio de Educación de Portugal e integrada por el rector de la Universidad de Lisboa; la *Prof. Daveau*; el presidente de la Sociedad Geológica de Portugal, el *Prof. Soares de Carvalho*; y los presidentes de los Grupos de Trabajo del Cuaternario Español y Portugués. La conferencia inaugural fue impartida por la *Prof. Suzanne Daveau* sobre “*Los Estudios del Cuaternario en Portugal*”. Durante este primer encuentro hispanoportugués se presentaron 83 comunicaciones y 15 pósteres, que se agruparon temáticamente en diferentes sesiones sobre: 1) *Glaciarismo ibérico*; 2) *Margen continental-Líneas de costa*; 3) *Prehistoria de la parte occidental de la península*; y 4) *Otras temáticas*. Se efectuaron 3 excursiones: una a los “*Sistemas glaciares de la Serra da Estrela y aspectos del Cuaternario de la Orla Atlántica*”; una segunda a las “*Terrazas cuaternarias de la Cuenca inferior del Tajo*”; y una última a las “*Formaciones plio-cuaternarias de la Península de Setúbal*”.

Como hemos indicado anteriormente, el año 1983 es un año muy importante para los estudios de Cuaternario en España. A la clausura de la *VI REUNIÓN NACIONAL DE CUATERNARIO* en el *Colegio Universitario de Vigo* (CUVI), se celebra una última Asamblea General del GETC. Durante esta asamblea general, presidida por el *Prof. Francisco Monturiol Rodríguez* (Edafología, CSIC), presidente de turno del Grupo de Trabajo, se acordó transformar el Grupo en *Asociación Científica con rango de Sociedad*. Dicha transformación fue llevada a cabo por la posterior junta directiva presidida por el *Dr. David Serrat i Congost*, que solicitó su registro como sociedad científica, denominada *Asociación Española para el*

Estudio del Cuaternario (AEQUA), en el Ministerio del Interior durante el mes de mayo de 1985, quedando oficialmente inscrita como asociación científica sin ánimo de lucro nº 60180 en el registro de asociaciones de ámbito estatal del Ministerio, el 13 de agosto del mismo año 1985. Pocos meses después, en octubre de 1985, tuvo lugar una primera *Asamblea General Extraordinaria de AEQUA* en la que se eligió a la *primera Junta Directiva de AEQUA*, constituida por las personas que se detallan en la Tabla 2.

6. La Creación de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario (1987-1988)

Por sugerencia del *Dr. Manuel Santonja*, la asociación adopta como escudo un motivo del arte rupestre levantino. El logo representa la figura de un *arquero neolítico* en marcha (Fig. 4). Se trata de una reproducción de uno de los guerreros pintados en “*La Cova dels Ca-*



Figura 4. Guerrero del arte rupestre levantino de la Cueva de los Caballos en el Barranco de Valltortá (Castellón) en el que se inspira el arquero del logo de AEQUA. Grabado digital sobre placa de fondo caliza. Pablo G. Silva 2024.

Figure 4. Warrior of the Levantine rock art from the “Horses Cave” in the Valltortá Creek (Castellón), which inspired the neolithic archer in the AEQUA logo. Digital engraving on limestone plate. Pablo G. Silva 2024.

Tabla 2: Composición de la primera Junta Directiva de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario (1983-1987)

Table 2: Composition of the first Executive Board of the Spanish society for Quaternary Research (1983-1987)

Presidente:	Alfredo Pérez-González (Instituto Geológico y Minero de España, IGME, Madrid).
Vicepresidente:	Mateo Gutiérrez Elorza (Dpto. CC. Tierra, Universidad de Zaragoza).
Secretaria:	Trinidad Aleixandre Campos (Instituto de Edafología y Biología Vegetal, CSIC, Madrid).
Tesorero:	Juan Gallardo Díaz (Instituto de Edafología y Biología Vegetal, CSIC, Madrid).
Vocales/as:	Fernando Díaz del Olmo (Dpto. Geografía Física, Universidad de Sevilla, Sevilla).
	José Ramón Díaz de Terán (Dpto. CC. Tierra Universidad de Cantabria, Santander).
	María Pilar Fumanal García (Dpto. Geografía, Universidad de Valencia, Valencia).
	José Luis Goy Goy (Dpto. Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid).
	Manuel Hoyos Gómez (Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC, Madrid).
	José Luis Peña Monné (Dpto. Geografía Física, Universidad de Zaragoza).
	Manuel Santonja Gómez (Museo Arqueológico de Salamanca).
	Joaquín Rodríguez Vidal (Dpto. Geología, Universidad de Huelva).
	Caridad Zazo Cardeña (Dpto. Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid).

valls” (Cueva de los Caballos), en el barranco de La Valltortá situada en el municipio de Tirig (Castellón). La Cova dels Cavalls es un abrigo kárstico de grandes dimensiones, declarada Monumento Artístico en 1924, situada en la Roca de les Estàbigues. La escena principal de arte rupestre representada no es de caballos sino de una cacería de ciervos, una manada de nueve miembros, la mayoría hembras y crías, intentando escapar de cuatro arqueros. El arquero de AEQUA fue previamente dibujado en una monografía de *Hugo Obermaier y Paul Wernert*, publicada el año 1919 y titulada “*Las pinturas rupestres del Barranco de la Valltortá (Castellón)*”. Desde 1924 se han descubierto veintiuna cavidades en el mismo barranco decoradas con centenares de figuras, constituyendo el más importante conjunto del Arte Rupestre del Arco Mediterráneo del Levante Español, declarado por la UNESCO *Patrimonio de la Humanidad* en el año 1998.

Una vez constituida oficialmente la asociación científica se continúa con la organización de la serie de Reuniones Nacionales de Cuaternario. Según el libro de registro de socios de la asociación, los socios fundadores de AEQUA procedentes del antiguo Grupo de Trabajo son 104, que quedan ordenados por orden alfabético desde el *socio nº 1, Eduardo Acaso Deltell* (UAH), hasta la *socia nº 104 Caridad Zazo Cardeña* (UCM). Durante el año 1986 siguen inscribiéndose personas hasta alcanzar un número de 147 a finales de diciembre. Durante el año 1987, y con motivo de la celebración de la primera reunión propiamente organizada por AEQUA (*VII REUNIÓN DE CUATERNARIO, Santander*), se incrementa considerablemente el número de asociados, hasta alcanzar un número de 210 socios antes de la celebración de esta reunión en el mes de septiembre de 1987.

En esta nueva etapa se potencia la relación con otras sociedades científicas afines por su temática firmando acuerdos-marco con las

siguientes organizaciones: Sociedad Geológica de España (SGE), Laboratorio Xeológico de Laxe (LXL), Sociedad Española de la Ciencia del Suelo (SECS) y la recién creada (1986) *Sociedad Española de Geomorfología (SEG)*. Con esta última se establece una intensa y estrecha colaboración, compartiéndose las ediciones del *Boletín “RAÑA”*, que se publica semestralmente, y de la *Revista “Cuaternario y Geomorfología”*, cuyo primer número se lanza en diciembre de 1987.

En 1987 se constituye el *Grupo Andaluz del Cuaternario (GAC-AEQUA)*, siendo su primer presidente el *Dr. Joaquín Rodríguez Vidal* de la Universidad de Huelva. Este nuevo grupo de trabajo se consolida a través de estos años por el incremento de asociados y las actividades desarrolladas: reuniones científicas periódicas, trabajos de investigación en equipo y la edición del libro guía “*Los aluvionamientos cuaternarios en la depresión inferior del Guadalquivir*” y “*El Cuaternario en Andalucía occidental*”. Este grupo también organiza la Segunda Reunión Hispanofrancesa de Karst Mediterráneo y la Reunión Internacional sobre suelos, paleosuelos y depósitos asociados. En ambas actuó de coordinador el *Prof. Fernando Díaz del Olmo*, que terminaría por presidir el GAC en 1992 y posteriormente sería presidente de AEQUA en el año 2001.

Del 21 al 26 de septiembre de 1987, se celebró la *VII REUNIÓN NACIONAL SOBRE CUATERNARIO* en el *Palacio de La Magdalena* (Santander) de la *Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP)*. La reunión fue organizada por el Departamento de Ciencias de la Tierra de la *Universidad de Cantabria*, actuando de secretario de la Reunión el *Dr. José Ramón Díaz de Terán*. Se sobrepasó el centenar de asistentes y se presentaron 76 comunicaciones agrupadas en diferentes sesiones de: Paleontología; Palinología; Prehistoria; Edafología; Geomorfología General; Dinámica fluvial; Vertientes; Neotectónica; Glaciaris-

mo; Periglaciario; Litoral; y Sedimentología de Formaciones y Depósitos Cuaternarios. Se celebraron 3 excursiones: una pre-reunión al glaciario de los Picos de Europa, otra intra-reunión a los valles de los ríos Miera y Calera-Ansón y la post-reunión, en la que se recorrieron zonas de estuario, rasas y depósitos marinos elevados de la cornisa cantábrica. Las guías de campo se editaron en una publicación aparte. Los trabajos presentados se publicaron en las actas editadas por la Universidad de Cantabria. Posteriormente, un conjunto de 22 trabajos seleccionados se agrupó en el primer volumen de la *Revista Cuaternario y Geomorfología*, publicado en diciembre de 1987. La revista constituye una publicación conjunta entre AEQUA y la Sociedad Española de Geomorfología (SEG) y su creación supuso un logro editorial y científico muy importante para la época. Fue la primera revista científica con revisión por pares en castellano que recogía diferentes temáticas relacionadas con la geología, paleontología, edafología y geomorfología del Cuaternario. Sus primeros editores fueron *Trinidad Aleixandre* (AEQUA) y *José Luis Peña Monné* (SEG). Desde el año 1987 se han publicado 38 volúmenes divididos en 75 números de tirada semestral.

Durante este periodo se publica el libro iniciático sobre los yacimientos de Atapuerca titulado "*El hombre fósil de Ibeas y el Pleistoceno de la sierra de Atapuerca*" (*Aguirre et al. 1987*) con importantes contribuciones de cuaternaristas hispanos como *Trinidad Torres* (UPM), *Manuel Hoyos* (CSIC), *Mercedes García Antón* (UMU), *Carmen Sesé* (CSIC), *Enrique Soto* (CSIC), *Jorge Morales* y *Loli Soria* (CSIC), *Pilar-Julia Pérez* (UCM), *José María Bermúdez de Castro* (CSIC), *Juan Luis Arsuaga* (UCM) y *Eudald Carbonell* (URV). Estos tres últimos heredarían la dirección del Proyecto Atapuerca tras la obligada jubilación de *Emiliano Aguirre* en 1991. Solo el arqueólogo *Eudald Carbonell* fue socio AEQUA entre los años 1986 y 2011, los otros dos (según consta en nuestras ba-

ses de datos) nunca estuvieron asociados a AEQUA. La aparición de los primeros cráneos fósiles humanos en la Sima de los Huesos en 1992 (Cráneo nº 5; denominado Miguelón), suponen el despegue cósmico de las excavaciones de Atapuerca y la generación de cátedras universitarias, institutos y centros de investigación "*ad hoc*", que acaban por separar, definitiva y desgraciadamente, los yacimientos de Atapuerca de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario. Atapuerca se convertirá en una institución en sí misma liderada por los tres herederos del profesor *Aguirre*, adquiriendo una inmensa y merecedora proyección internacional, pero su vinculación con AEQUA queda progresivamente relegada a un enésimo plano.

Durante finales de los ochenta se impulsa, desde la junta directiva de la asociación, la organización de reuniones de campo. En 1988 tuvo lugar en Galicia una de ellas sobre Geomorfología Granítica, organizada por el Dr. J.R. Vidal Romaní del *Grupo de Trabajo Gallego*, y en 1989 se celebró otra en Valencia sobre Líneas de Costa, siendo responsable de la misma la Dra. *María Pilar Fumanal* de la Universidad de Valencia. Esta reunión de campo sería el germen para la futura fundación del Grupo Valenciano de Cuaternario (GQV). No obstante, durante este primer periodo de la asociación el ítem de mayor importancia, con diferencia, fue la celebración de la 2ª REUNIÓN DE CUATERNARIO IBERICO que tuvo lugar en Madrid en *septiembre de 1989*. Consecuencia de toda esta actividad fue el crecimiento exponencial de la asociación que justo antes de dicha reunión alcanzo los 311 socios, doblando así el número inicial de asociados.

7. La Segunda Reunión de Cuaternario Ibérico (Madrid, w1989)

La 2ª REUNIÓN DE CUATERNARIO IBERICO organizada por AEQUA tuvo lugar en Madrid, en las instalaciones de la Facultad de Geología de

la Universidad Complutense de Madrid (UCM), entre el 25 y el 29 de septiembre de 1989 (Fig. 5; *Aleixandre y Pérez González, 1989*). Esta reunión estuvo convocada, además de por la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario, por el Grupo de Trabalho Portugues para o Estudo do Quaternário (GTPEO) y el Comité Español del Cuaternario, con la colaboración científica de la Sociedad Geológica de España (SGE), la Sociedad Española de Geomorfología (SEG) y la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo (SECS), y el patrocinio del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Probablemente, esta reunión internacional de Madrid fue la que atrajo al mayor número de científicos cuaternaristas desde que, en la lejana fecha de 1957, se celebró en España el V Congreso Internacional de INQUA. Los participantes a esta segunda reunión hispanoportuguesa fueron 321 de once nacionalidades, siendo, como es lógico, la mayoría procedentes de España (244) y Portugal (53).



Figura 5. Logo de la 2ª Reunión de Cuaternario Ibérico celebrada en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) en 1989.

Figure 5. Logo of the 2nd Iberian Quaternary Meeting held at the Faculty of Geological Sciences of the Complutense University of Madrid (UCM) in 1989.

El acto oficial de apertura, celebrado en el Salón de Actos de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid, estuvo presidido por el rector de la UCM *Prof. Gustavo Villapalos*, al que acompañaban el presidente del CSIC, *Prof. Emilio Muñoz*, la decana de la Facultad, *Prof. Mercedes Doval*, el Consejero de Educación de la Comunidad de Madrid, *Dr. Jaime Lissavetzky*, el director del ITGE, *Prof. Emilio Llorente*, el presidente de INQUA, *Prof. Nat Rutter*, así como los presidentes de honor de la reunión, los profesores *Gaspar Soares de Carvalho* (GTPQ) y *Emiliano Aguirre* (AEQUA).

El programa científico estuvo dividido en siete sesiones, en las cuales se presentaron 181 trabajos, 35 de ellos en formato póster. Las sesiones que contaron con un mayor número de trabajos fueron las de “Estratigrafía, sedimentología y geomorfología del Cuaternario” (Sesión A) y la de “Procesos actuales y antiguos del Cuaternario” (Sesión D). Asimismo, durante la reunión se impartieron *nueve conferencias plenarias* con temáticas acordes a las diferentes sesiones científicas temáticas en que se dividió la reunión (*Aleixandre y Pérez-González, 1989*). La *conferencia de apertura* fue impartida por el *Prof. Nat Rutter*, de la Universidad de Alberta (Canadá), y *presidente de INQUA* durante el periodo 1998-2002. El título de la conferencia inaugural fue: “*Relationship of INQUA to the Global Change Program and the other international Groups*”.

Otras actividades fueron las reuniones temáticas celebradas por las *Comisiones de Líneas de Costa* y de *Neotectónica de INQUA*, presididas por sus respectivos presidentes los profesores *Saskia Jelsgerma* (The Netherlands) y *Niklas-Axel Mörner* (Sweden) respectivamente. Cabe destacar que durante la reunión de la Comisión de Neotectónica de INQUA se aprobó la iniciación de los trabajos para la elaboración de un futuro “*Mapa Neotectónico de Europa*”. En el capítulo de excursiones



Figura 6. Organizadores de la 2ª Reunión de Cuaternario Ibérico en la presentación del Congreso en la Facultad de Ciencias Geológicas de Madrid (UCM). De izquierda a derecha Manuel Santonja, Caridad Zazo, Alfredo Pérez-González y Trinidad Aleixandre. Archivo fotográfico AEQUA.

Figure 6. Organizers of the 2nd Quaternary Iberian Meeting at the presentation of the Congress in the Faculty of Geological Sciences of Madrid (UCM). From left to right Manuel Santonja, Caridad Zazo, Alfredo Pérez-González and Trinidad Aleixandre. AEQUA Photo Archive.

científicas se realizaron seis durante la reunión y hubo una Post-reunión de cinco días de duración al *litoral mediterráneo* dirigida por Caridad Zazo (CSIC), José Luis Goy (UCM) y Pilar Fumanal (UV). Finalmente, se celebró una asamblea conjunta de AEQUA - GTPEQ, que acordó por unanimidad continuar esta exitosa serie de reuniones hispanoportuguesas y emplazar la celebración de una 3ª Reunión del Cuaternario Ibérico en Coimbra (Portugal) para el año 1993. De esta manera se genera la alternancia de celebraciones de Reuniones Nacionales de Cuaternario (AEQUA) y Reuniones de Cuaternario Ibérico cada dos años. En años posteriores esta colaboración se regularía mediante el establecimiento de un convenio y un reglamento "ad hoc".

Durante la reunión se presenta el *Mapa del Cuaternario de España escala 1.000.000*, editado por el entonces denominado *Instituto Tecnológico y Minero de España (ITGE)*, figu-

rando como *Coordinadores: Alfredo Pérez-González* (presidente AEQUA), *Pilar Cabra* y *Ángel Martín-Serrano* (IGME), con la colaboración de numerosos cuaternaristas, la mayoría de los cuales son asociados de AEOUA. El mapa se publica finalmente a finales 1989. Su memoria se divide en los siguientes apartados introductorios: *Marco Geológico y Tectónico* (R. Capote y G. de Vicente, UCM-Madrid); *Clima y Vegetación* (J.M. Rubio Recio, US-Sevilla); *Formaciones Edáficas* (J. Gallardo y J.L. Martín de Vidales, UAM-Madrid); *Vertebrados del Pleistoceno Continental* (E. Aguirre, MNCN, CSIC); *Arqueología del Pleistoceno* (M. Santonja, Museo de Salamanca). Todos ellos seguidos por un breve resumen del estado del arte de los depósitos y formas cuaternarias en las distintas regiones geológicas de España: Galicia (J.R. Vidal Romaní, LXL – A Coruña); Cornisa Cantábrica (M. Hoyos, MNCN, CSIC); Pirineos (D. Serrat, UB-Barcelona); Depresión del Ebro y Cordillera Ibérica (M. Gutiérrez-



Figura 7. Algunos ilustres asistentes a la Conferencia Inaugural de la 2ª Reunión de Cuaternario Ibérico. De izquierda a derecha Caridad Zazo, Elvira Roquero, Ángel Martín Serrano, José Luis Goy. Archivo fotográfico AEQUA.

Figure 7. Some distinguished participants at the Inaugural Conference of the 2nd Iberian Quaternary Meeting. From left to right Caridad Zazo, Elvira Roquero, Ángel Martín Serrano, José Luis Goy. AEQUA Photo Archive.

Elorza y J.L. Peña Monné, UNIZAR-Zaragoza); Depresión del Duero (E. Molina —USAL— y A. Pérez-González —UCM—); Sistema Central (J. de Pedraza, UCM-Madrid); Depresión del Tajo (A. Pérez-González, E. Ancochea —UCM— y P. Cabra —IGME—); Montes de Toledo y Extremadura (A. Martín Serrano, IGME); Sierra Morena (J. Rodríguez Vidal —UHU— y F. Díaz del Olmo —US—); Cordillera Bética y Levante peninsular (J.L. Goy, C. Zazo —UCM— y J. Baena —ENADIMSA—); Islas Baleares (P. del Olmo, CGS, Madrid); Islas Canarias (J. Meco, ULL); y El Margen Continental (J. Rey —IEO— y T. Medialdea —IGME—). Un último capítulo dedicado a *Explotaciones de Rocas y Minerales Industriales en formaciones cuaternarias* fue elaborado por especialistas de la Dirección de Recursos Minerales del ITGE (M. Peralta, L.A. Díaz Rodríguez y V. Calderón).

Durante la asamblea general que tuvo lugar en esa 2ª Reunión de Cuaternario Ibérico se renueva el *Comité Español del Cuaternario (INQUA)*, que pasa a presidir la *Dra. Caridad Zazo* (CSIC), dando el relevo a Emiliano Aguirre, y del que formaban parte los representantes españoles en las diferentes comisiones y subcomisiones de INQUA.

Otra faceta de la actividad desarrollada por la asociación en este primer ciclo es la institución del *premio “María Jesús Ibáñez”*, en memoria de una de las primeras asociadas al GETC y AEQUA y entusiasta cuaternarista, destinado a premiar trianualmente los mejores trabajos de investigación sobre el Cuaternario y la Geomorfología en España. María Jesús Ibáñez fue catedrática de Geografía Física de la Universidad de Zaragoza, y a su muerte en 1985 donó una respetable cantidad de dinero para incentivar la investigación del Cuaternario a jóvenes investigadores. El dinero fue gestionado por una fundación de la Universidad de Zaragoza (Fundación M^{ra} Jesús Ibáñez) adscrita a ese Departamento y AEQUA, tal y como figuraba en su Acta de Constitución de fecha septiembre de 1987. Hasta el año 2008 el premio lo concedía la fundación, pasando a ser gestionado directamente por AEQUA y SEG desde entonces. La *Fundación M^{ra} Jesús Ibáñez* quedó disuelta tal y como expresa el *Art. 3º del Reglamento del Premio* suscrito por ambas sociedades científicas en 2009.

Tras distintas vicisitudes, *la primera convocatoria del premio* se lanzó en 1991 para premiar los mejores trabajos de investigación realizados en el trienio 1989-1991. El premio de la primera convocatoria se concedió “*ex aequo*” al *Dr. D. Javier Gracia Prieto* (UNIZAR) por su tesis doctoral “*Geomorfología de la Región de Gallocanta (Cordillera Ibérica Central)*” y a la *Dra. Dña. María Victoria Lozano Tena* (UNIZAR) por su tesis doctoral: “*Estudio geomorfológico de la Sierra de Gúdar (Provincia de Teruel)*”. La entrega de este tuvo lugar en la *Universidad de Murcia*, el 24 de sep-

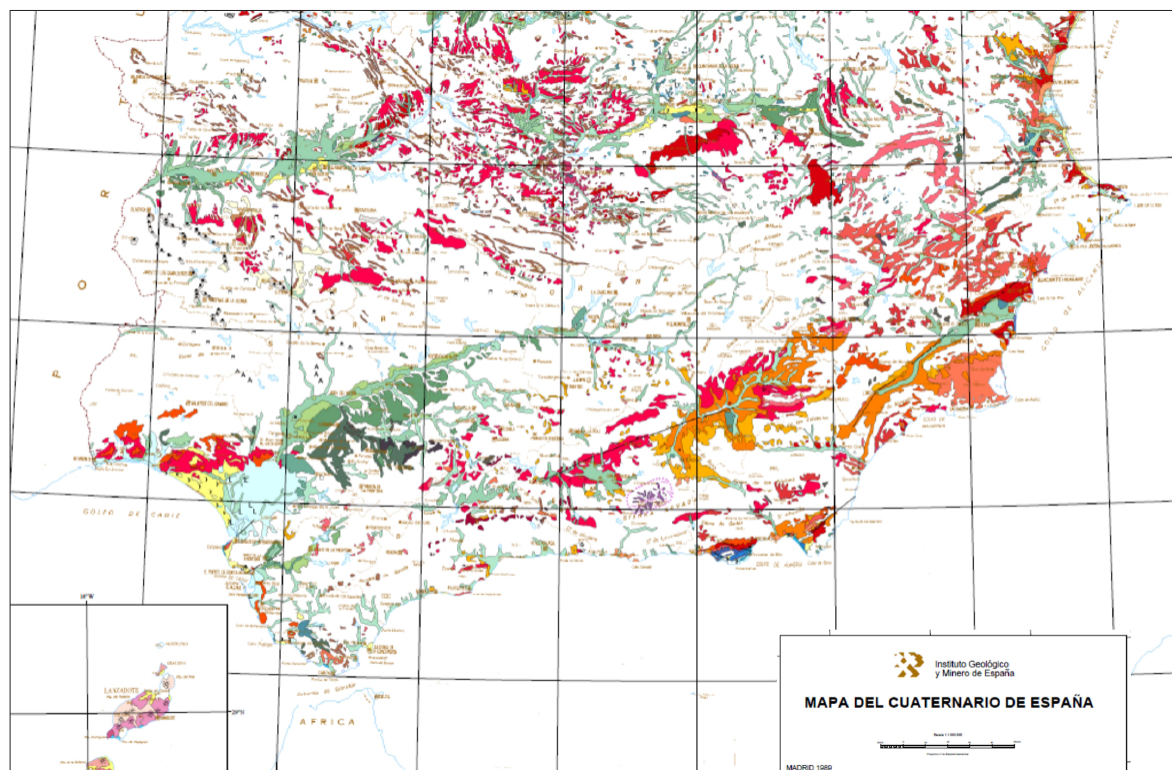


Figura 8. Detalle de la mitad meridional de la Península Ibérica incluida en el Mapa de Cuaternario de España escala 1:1.000.000 editado por el Instituto Tecnológico Geo-Minero de España (ITGE) coincidiendo con la celebración de la 2ª Reunión de Cuaternario Ibérico. <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/>

Figure 8. Detail of the southern half of the Iberian Peninsula included in the Quaternary Map of Spain scale 1:1.000.000 published by the Spanish Geological Survey (ITGE) coinciding with the celebration of the 2nd Iberian Quaternary Meeting. <https://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/>

tiembre de 1992, con ocasión de la II Reunión Nacional de Geomorfología (SEG).

8. Corolario

Hasta aquí la historia de AEQUA hasta el final de la década de los ochenta. La 2ª REUNIÓN DE CUATERNARIO IBÉRICO, celebrada en la Universidad Complutense de Madrid (UCM), fue uno de los hitos más importantes de la naciente asociación científica y puso las bases para posteriores investigaciones y colaboraciones dentro de ámbitos científicos nacionales e internacionales. Las reuniones nacionales AEQUA e internacionales (REQUI e INQUA), la Comisión Nacional de INQUA, los premios María Jesús Ibáñez (MJiB) y la revista

Cuaternario y Geomorfología (CyG) estaban ya lanzados. El Dr. Joaquín Rodríguez-Vidal (UHU) toma el relevo como presidente de AEQUA en 1990 y se abre una nueva etapa que detallaremos en un segundo capítulo sobre los estudios de Cuaternario en España.

De lo comentado en esta primera etapa (1973-1990) cabe destacar que, en un principio, AEQUA fue promovida por tres timones principales: 1) Los estudios de edafología en los departamentos e institutos de Edafología, Química Agrícola y Biología Vegetal de diferentes instituciones y universidades; 2) los yacimientos paleolíticos y arte rupestre de la cornisa cantábrica y levante peninsular; y 3) los estudios sobre paleontología de vertebrados y evolución

humana liderados por el *Prof. Emiliano Aguirre*. Aparte de este distinguido asociado, impulsor de los estudios modernos de Cuaternario en España, en este primer periodo destacan otros nombres, como principales promotores de AEQUA: *Alfredo Pérez-González (UCM-ITGE)*, *Trinidad Aleixandre (CSIC)*, *David Serrat i Congost (UB)*, *Juan Ramón Vidal-Romaní (LXL)*, *Manuel Hoyos (CSIC)*, *Manuel Santonja (Museo de Salamanca)* y *Caridad Zazo (UCM-CSIC)* entre otros muchos.

Agradecimientos

Este trabajo constituye la primera parte de una serie de tres artículos que glosan y revisan la historia de los estudios de Cuaternario en España (y por extensión la península ibérica) con motivo del 40 aniversario de la creación de la Asociación Española para el Estudio del Cuaternario. Los autores de la serie están agradecidos a todas aquellas personas que han impulsado AEQUA durante sus distintos periodos, en particular a los responsables de sus juntas directivas y, muy especialmente, a la memoria del **Profesor Emiliano Aguirre Enríquez**, impulsor de nuestra asociación y de los estudios modernos de Cuaternario en España. Los autores están agradecidos por la revisión de los textos por parte de Gerardo Benito, Teresa Bardají y Begoña Bautista.

Bibliografía

Aguirre, E. (1969). *Actas del V Congreso Internacional de INQUA, Madrid-Barcelona, 1957*. Reimpresión del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, Madrid. 797 pp. (con Prólogo de Emiliano Aguirre)

Aguirre, E. y Passini, G. (1985). The Pliocene-Pleistocene Boundary. *Episodes*, 8 (2), 116 – 120. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1985/v8i2/009>

Aguirre, E., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M. (1987). *El hombre fósil de Ibeas y el Pleistoceno de la sierra de Atapuerca*. Consejería de Cultura y Turismo, Junta de Castilla y León, Valladolid (España), 440 págs.

Aleixandre, T. y Pérez-González, A. (1989). Historia de la Asociación Española Para el Estudio del Cuaternario (AEQUA, 1973-1992). *Actas 2ª Reunión de Cuaternario Ibérico, Prólogo Vol. 1*. Instituto Tecnológico Geo-Minero de España (ITGE), Madrid, España, pp. 1-4.

Bardají, T., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L. (2022). El Estudio del Cuaternario en España y la Sociedad Científica que lo impulsa: AEQUA. *Encuentros Multidisciplinares*, 71. 1-7.

Leguey Jiménez, S. (2003). La prehistoria de los geólogos. En: *La Geología en imágenes* (Mirre Mayo, S., Ed.). Ilustre Colegio Oficial de Geólogos: Madrid. pp. 13-14. <https://www.icog.es/TyT/index.php/2003/10/la-prehistoria-de-los-geologos/>

Malet, A. (2009). José María Albareda (1902-1966) and the formation of the Spanish Consejo Superior de Investigaciones Científicas, *Annals of Science*, 3, 307-332. <https://doi.org/10.1080/00033790902961819>

Martínez Valle, R. y Villaverde, V., Coords. (2002). *La Cova Dels Cavalls En El Barranc De La Valltorta (Tirig, Castellón)*. Monografías del Instituto de Arte Rupestre. Museu de la Valltorta (Tigri, Castellón). Generalitat Valenciana, Valencia. 86 pp.

Obermaier, H. y Wernert, P. (1919) Las pinturas rupestres del Barranco de la Valltorta. Comisión de Investigaciones Paleontológicas y Prehistóricas, 23. Madrid.

Pérez González, A., Cabra, P., Martín Serrano, A. (1989). *Mapa del Cuaternario de España 1:1.000.000*. Instituto Tecnológico Geo-Minero de España (ITGE), Madrid. 279 pp.

Rosas, A. (2022). In memoriam, Emiliano Aguirre Enríquez (1925 - 2021). *Journal of Human Evolution*, 167, 10319. 1 <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2022.103194>

Rosas, A., Silva, P.G., (2021). Emiliano Aguirre Enríquez (1925-2021): Una figura imprescindible de las ciencias del Cuaternario en España. *Cuaternario y Geomorfología*. 24, 3-6.

Silva, P.G., López, N., Sesé, C., Bardají, T. (2010). Acto Homenaje a Emiliano Aguirre: El Linaje de Emiliano. Teruel, noviembre 2009. *Cuaternario y Geomorfología*. 24, 3-6.

Smalley, I. (2011). A History of INQUA - The International Union for Quaternary Research. *Quaternary perspectives*. <https://inqua.org/about/history>

Recibido el 17 de septiembre de 2024
Aceptado el 20 de noviembre de 2024



La investigación paleoambiental a través de los depósitos edafo-sedimentarios: revisión bibliográfica de la costa gallega (NO Península Ibérica)

*Paleoenvironmental research through edapho-sedimentary deposits:
bibliographic review of the Galician coast (NW Iberian Peninsula)*

Cajade-Pascual, D.⁽¹⁾

(1) Departamento de Geografía, Universidade de Santiago de Compostela (USC). Grupo de estudios medioambientales aplicados al patrimonio natural y cultural (GEMAP). 15704 Santiago de Compostela, España. danielcajade.pascual@usc.es

Resumen

Los depósitos edafo-sedimentarios costeros son formas de acumulación cuaternarias empleadas para la investigación paleoambiental. La costa de Galicia (NO Península Ibérica) presenta una alta densidad de depósitos, localizados en diferentes ambientes costeros y que, en muchos casos, aparecen fosilizando las morfologías heredadas del pasado. En este trabajo se realiza una revisión bibliográfica de la investigación paleoambiental a través del estudio de los depósitos edafo-sedimentarios de la costa gallega, diferenciando la naturaleza de las facies y su marco cronológico (Pleistoceno y Holoceno). El análisis de los estudios realizados permite identificar las principales fortalezas y debilidades interpretativas y evaluar el potencial científico de los depósitos como archivo paleoambiental.

Palabras clave: Pleistoceno, Holoceno, facies sedimentarias, Galicia, geomorfología costera, litoral, edafogénesis.

Abstract

Coastal edapho-sedimentary deposits are Quaternary accumulation landforms used for paleoenvironmental research. The coast of Galicia (NW Iberian Peninsula) presents a high density of deposits, located in different coastal environments and which, in many cases, appear fossilizing morphologies inherited from the past. In this work, a bibliographic review of paleoenvironmental research is carried out through the study of edapho-sedimentary deposits of the Galician coast, differentiating the nature of the facies and their chronological framework (Pleistocene and Holocene). The analysis of the studies allows us to identify the main interpre-



tive strengths and weaknesses and evaluate the scientific potential of the deposits as a paleoenvironmental archive.

Key words: Pleistocene, Holocene, sedimentary facies, Galicia, coastal geomorphology, shoreline, edaphogenesis.

1. Introducción

El propósito de la reconstrucción paleoambiental se centra en interpretar las condiciones bióticas y abióticas pretéritas de un espacio determinado, a través del análisis de las diferentes señales almacenadas en archivos paleoambientales. Por señales se entiende a todas aquellas propiedades interpretables (geomorfológicas, sedimentarias, edáficas, fisicoquímicas, biológicas, antrópicas, etc.) resultado de un cambio en las condiciones ambientales. El término archivo alude a los medios que contienen dichas señales, pudiendo ser de origen natural (depósitos edafo-sedimentarios, turberas, corales, masas de hielo, vegetación, etc.) o antrópica (yacimientos arqueológicos, antroposoles, etc.) (Martínez-Cortizas, 2000; Martínez-Cortizas *et al.*, 2009). Entre los archivos más empleados en los estudios paleoambientales del NO Peninsular se encuentran los depósitos edafo-sedimentarios, localizados en diferentes ambientes, y con rangos y resoluciones temporales diversas. Los depósitos son resultado de la acumulación de sedimentos y de actividad edafogenética, cuya formación y evolución puede derivar de procesos heterogéneos. El reconocimiento de variaciones climáticas y ambientales a partir del estudio de los sedimentos resulta complejo ante la ausencia de indicadores o señales que, por sí solos, permitan definir las condiciones ambientales (Gibbard y West, 2000). Unas de las principales limitaciones de los depósitos edafo-sedimentarios es su registro escaso e incompleto en relación con la historia geológica. Además, los resultados están sujetos a factores locales y regionales, que pueden

resultar problemáticos para su equiparación a escalas superiores (Gibbard y Lewin, 2016). Esta limitación no les resta potencial como archivos paleoambientales, por cuanto los depósitos pueden albergar secuencias muy completas y de alta resolución para períodos de miles de años, ofreciendo evidencias de cambios climáticos, variaciones del nivel del mar, procesos geomorfológicos o de cambios en la flora y la fauna. Las secuencias holoceanas mejor conservadas y con datos arqueológicos suficientes permiten testimoniar los cambios sociales acontecidos en el pasado (Walker *et al.*, 2012).

Las geoformas costeras actuales son el resultado de los diferentes procesos continentales, costeros y marinos ligados a las variaciones de las condiciones ambientales a lo largo del Cuaternario. Entre estas geoformas, los depósitos edafo-sedimentarios costeros se configuran como un excelente indicador paleoambiental gracias a su alta capacidad (i) para registrar variaciones ambientales, (ii) reflejarlas en sus propiedades, y (iii) conservarlas en el tiempo (Costa-Casais *et al.*, 1996a; Tallón-Armada *et al.*, 2015). Los depósitos cuaternarios costeros son el resultado de múltiples factores y procesos, siendo los cambios del nivel del mar uno de los aspectos más determinantes en su configuración durante el Holoceno. Estas variaciones no solo suponen un desplazamiento de la línea litoral, sino que también modifican las dinámicas sedimentarias, afectando a los propios depósitos (Pirazzoli, 1996; Dabrio, 2010). Según Dabrio (2010) los estudios de los sedimentos costeros se centran en el análisis de facies y en la asociación con depósitos próximos, con especial hincapié en las

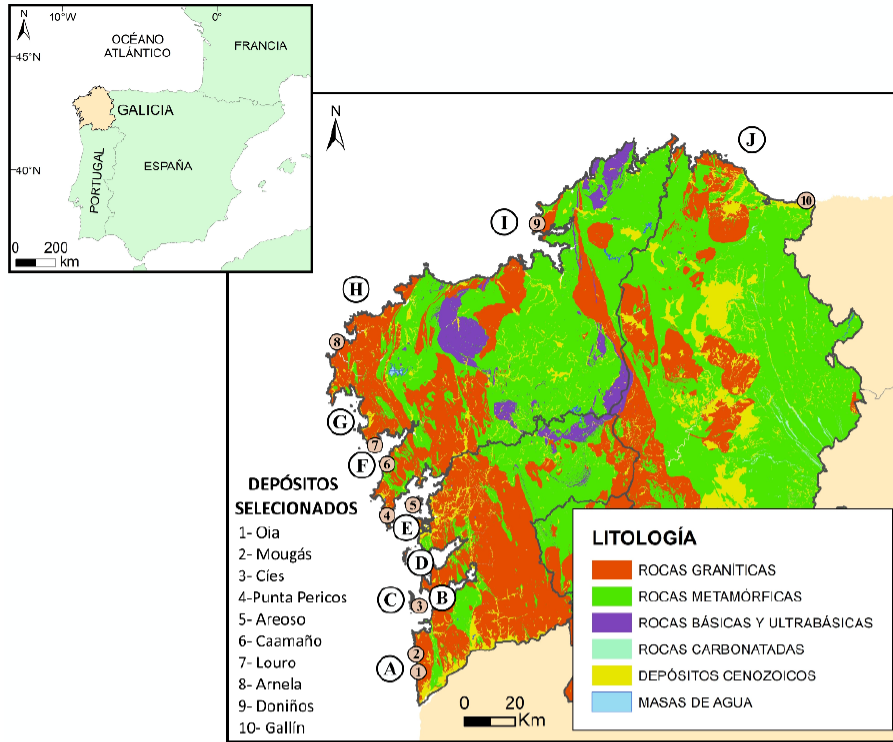
variaciones de los tamaños de grano, la continuidad de las estructuras sedimentarias y la presencia de superficies erosivas. No obstante, el enfoque interdisciplinar es fundamental para realizar reconstrucciones integradas y precisas, sobre todo en ambientes complejos y dinámicos como los costeros, permitiendo así una mejor comprensión de la respuesta de estos sistemas a los cambios ambientales. Este aspecto se antoja crucial para la gestión y conservación de estos espacios, pero también para predecir los efectos de cambios futuros (García-Moreiras, 2017; Cartelle *et al.*, 2022; Cajade-Pascual, 2024). Este trabajo revisa 70 artículos de investigación, 19 capítulos de libro, 9 comunicaciones a congresos científicos y 6 tesis doctorales cuya temática aborda la investigación paleoambiental a través del estudio de los depósitos edafo-sedimentarios de la costa gallega, permitiendo identificar fortalezas y debilidades interpretativas y evaluar su potencial como archivo paleoambiental.

2. Contexto regional

La costa de Galicia se localiza en el extremo NO de la Península Ibérica y se extiende desde el estuario del río Eo, al norte, hasta la desembocadura del río Miño, al sur. Presenta características morfológicas distintivas respecto al resto de las costas atlánticas ibéricas. El marcado control estructural y litológico definen su morfología recortada. Las litologías graníticas dominan en la mitad sur (Figura 1), mientras que en el golfo Ártabro y la zona cantábrica están conformados principalmente por materiales metamórficos. En el extremo NO se sitúa el pequeño complejo de Cabo Ortegal, donde afloran rocas básicas y ultrabásicas. El basamento de la costa gallega forma parte del Macizo Ibérico, compuesto por materiales pre-mesozoicos deformados y metamorfizados durante la orogenia Varisca,

junto con la intrusión de cuerpos magmáticos tardihercínicos (Pérez-Estaún *et al.*, 2004; Martínez-Catalán *et al.*, 2009). A partir de Cretácico Superior, la orogenia Alpina causó una reactivación del sistema de fracturas varisco (N-S, NO-SE y NE-SO) y el levantamiento/hundimiento de bloques tectónicos (Pérez-Alberti, 2001; Martín-González y Heredia, 2011). Estos condicionantes estructurales desempeñaron un papel fundamental en la formación de las rías y la compleja configuración de la costa actual (Pérez-Alberti, 2021). El intenso patrón de fracturación ha favorecido los procesos de meteorización y alteración, que influyen directamente en las morfologías costeras, originando una respuesta diferencial ante los procesos erosivos (Pérez-Alberti *et al.*, 2009).

Debido a su localización en las latitudes medias del hemisferio norte, Galicia se encuentra bajo el dominio de la circulación general del oeste. Presenta un clima oceánico, aunque con ciertas diferencias entre la fachada atlántica y la cantábrica. Las situaciones ciclónicas tienen una componente SO, O y NO, mientras que las condiciones de mayor estabilidad presentan una componente N-NE (Martínez-Cortizas y Pérez-Alberti, 1999; Martí *et al.*, 2019). La costa gallega es mesomareal de ciclo semidiurno, con amplitudes medias de marea de entre 2 y 3 metros. El oleaje de componente O y SO se vincula a la actividad ciclónica, mientras que la componente NO, la más frecuente, tiende a combinar temporales de mar de viento con una alta exposición a mar de fondo. Si bien es una costa expuesta al oleaje y a las tormentas procedentes del océano, existen grandes variaciones según la orientación del litoral, en buena parte derivado de su trazado recortado, provocando una elevada variabilidad en el grado de exposición y el régimen energético (Blanco-Chao, 2019).



Id.	Sector costero	Referencias bibliográficas
A	Costa Sur y estuario del Miño	Nonn, 1966; Butzer, 1967; Franz, 1967; Brosche, 1982; Saa, 1985; Saa y Díaz-Fierros, 1988; Costa-Casais et al., 1996b, 2002, 2003, 2008; Cano et al., 1997; Gómez-Orellana et al., 1998, 2013; Pérez-Alberti et al., 1998b, 1998c; Ramil-Rego et al., 1998a, 1998b; Blanco-Chao y Costa-Casais, 2001; Blanco-Chao et al. 2002, 2003, 2009, 2019; Martínez-Cortizas et al., 2009; Leorri et al., 2012; Costa-Casais y Caetano Alves, 2013; Moreno et al., 2014.
B	Ría de Vigo	Butzer, 1967; Franz, 1967; Martínez-Cortizas y Costa-Casais, 1997; Clemente et al., 2004; Nombela et al., 2005; Pérez-Arlucea et al., 2005; Barragán et al., 2009; Méndez Martínez et al., 2011; Tallón-Armada et al., 2013, 2015.
C	Islas Cies	Martínez-Cortizas et al., 1996, 1997; Costas, 2006; Costas et al., 2009; Arce-Chamorro et al., 2021, 2022a, 2022b, 2022c.
D	Ría de Pontevedra	Franz, 1967; Díaz-Fierros et al., 1989; Pérez-Alberti et al., 2018.
E	Ría de Arousa	de Jong y Poortman, 1970; Brosche, 1983; Saa y Díaz-Fierros, 1983; Leiros y Guitián, 1983; Díaz-Fierros et al., 1989; Martínez-Graña et al., 2000; Costa-Casais et al. 2012; Blanco-Chao et al., 2017; Cajade-Pascual et al., 2019, 2021, 2023; Cajade-Pascual, 2024.
F	Ría de Muros e Noia y ensenada de Corrubedo	Mensching, 1961; Saa y Díaz-Fierros, 1985; Vilas et al., 1986; Costa-Casais, 2001; Costa-Casais et al., 1994, 2003, 2007; Pérez-Alberti et al., 1998b, 1998c; Trenhaile et al., 1999; Alonso y Pagés, 2000, 2007; Pérez-Alberti, 2000; Blanco-Chao et al., 2002, 2009, 2019; Martínez-Cortizas et al., 2009; Gómez-Orellana et al., 2013.
G	Louro-Fisterra	Costa-Casais et al., 1996a; González-Villanueva et al., 2009, 2015; Méndez Martínez et al., 2011.
H	Costa da Morte	Devoy et al., 1996; Pérez-Alberti et al., 1999; Alonso y Pagés, 2000, 2007, 2010; Costa-Casais, 2001; Blanco-Chao et al., 2002; Bao et al., 2007; Arribas et al., 2010.
I	Costa Ártabra	Franz, 1967; Asensio Amor y Grajal, 1983; Brosche, 1983; Leiros y Guitián, 1983; Saa y Díaz-Fierros, 1985; Díaz-Fierros et al., 1989; Nieto Freire y Vidal Romani, 1989; Santos y Vidal Romani, 1993; Santos et al., 1993, 2001; Alonso et al., 2003; Alonso y Pagés, 2000, 2007, 2010; Fernández-Mosquera et al., 2007; Arribas et al., 2010; Trindade et al., 2013; Sáez et al., 2018; Gómez-Orellana et al., 2021; Arce-Chamorro et al., 2022b.
J	Rías Altas-Mariña Lucense	Delibrias et al., 1964; Brosche, 1983; Asensio Amor, 1985; Barral Silva et al., 1985; Asensio Amor y González Martín, 1987; Copa Novo y Asensio Amor, 1987; Saa y Díaz-Fierros, 1988; Alonso y Pagés, 2000, 2007; Gómez-Orellana et al., 2007; Feal-Pérez, 2012; Feal-Pérez et al., 2009, 2011, 2014; Arribas et al., 2010.

Figura 1: Área de estudio y localización de los depósitos estudiados por sectores costeros.

Figure 1: Study area and location of the deposits studied by coastal sectors.

3. Los depósitos edafo-sedimentarios de la costa gallega

La complejidad estructural y litológica de la costa gallega favorecieron un ambiente morfogenético dominado por los procesos fríos durante el último episodio glaciario (Blanco-Chao *et al.*, 2003). Bajo estas condiciones, las formas costeras antiguas fueron fosilizadas por material continental, hasta que la transgresión holocena las expuso nuevamente, por lo que gran cantidad de los procesos costeros actuales están operando sobre morfologías heredadas, incluidas plataformas litorales, acantilados o playas de bloques, entre otros (Pérez-Alberti *et al.*, 1997, 1998a; Trenhaile *et al.*, 1999; Blanco-Chao *et al.*, 2003; Arribas *et al.*, 2010). Esta morfología compleja favoreció la abundancia y conservación de secuencias costero-continentales de buena resolución (Santos y Vidal-Romaní, 1993; Tallón-Armada *et al.*, 2015), cuyo marco cronológico abarca desde el último interglaciario hasta la actualidad. Por el contrario, según Alonso y Pagés (2000) el carácter recortado de la costa gallega no favorece una continuidad en la sedimentación, tanto vertical como horizontal. De este modo, el registro sedimentario está conformado por secuencias fragmentadas y desconectadas entre sí, limitando su potencial para la reconstrucción paleoambiental. Ante la falta de series sedimentarias largas, es preciso llevar a cabo estudios de alta resolución en diferentes sectores y ambientes que permitan establecer una secuenciación continua. Frente a cambios en las condiciones ambientales, las estructuras edafo-sedimentarias tienden a reflejar respuestas semejantes, aunque sujetas a factores locales (Gibbard y West, 2000; Costa-Casais, 2001; Costa-Casais *et al.*, 2003).

Los depósitos edafo-sedimentarios presentan características y génesis heterogéneas, reflejo de los cambios en las condiciones ambientales (Costa-Casais *et al.*, 1996a, 1996b, 2003), siendo el resultado tanto de los cambios del

nivel del mar y de las dinámicas climáticas, como de las condiciones locales de deposición. Según Pérez-Alberti *et al.* (1998b) y Costa-Casais (2001) las características que definen individualmente los depósitos dependen de cuatro aspectos: (a) configuración morfológica previa a la deposición; (b) localización (factores como la exposición, la orientación o la topografía, influyen significativamente en los procesos de erosión y deposición); (c) área fuente del material; y (d) naturaleza de las facies sedimentarias. Esta caracterización permite la identificación de las condiciones de formación de los diferentes niveles y vislumbrar los posibles cambios acontecidos en las dinámicas (Costa-Casais, 2001). En el caso de la costa gallega, la existencia de depósitos edafo-sedimentarios de naturaleza diversa (acantilados sedimentarios, niveles intermareales, sistemas playa-duna, sistemas barrena-laguna, etc.) permiten interpretar las condiciones ambientales durante los últimos 130 ka BP.

Una de las primeras referencias al estudio de depósitos de la costa gallega es la de Birot y Solé (1954, como se citó en Asensio Amor y González Martín, 1992), donde se analizan acumulaciones detríticas sobre niveles de rasa, interpretados como depósitos de solifluxión originados durante el último período glaciario. En la década de 1960 se realizan una serie de estudios sobre la génesis de los depósitos costeros, aunque con cierta carencia de aspectos edáficos. Mensching (1961) identifica una serie de niveles marinos antiguos en la ría de Muros y Noia, relacionándolos con la posible formación de las rías. Delibrias *et al.* (1964) estudian un depósito sobre niveles de "rasa cantábrica". Por su parte Nonn (1966) señala, con un enfoque geomorfológico, la existencia de depósitos a lo largo de toda la costa gallega, realizando estudios en detalle, como el caso del depósito de Mougás, en Oia. Por su parte, Butzer (1967) realizó una interpretación de los cambios ambientales sobre

la información paleoecológica del yacimiento paleolítico de las Gándaras de Budiño, relacionándola con facies sedimentarias identificadas en otros depósitos del SO de Galicia. En las últimas tres décadas se ha incrementado notablemente el número de estudios en depósitos edafo-sedimentarios, abarcándose una amplia variedad de ambientes de la costa gallega (Figura 2). Para facilitar la revisión bibliográfica, las referencias se organizan según el ambiente costero objeto de estudio: sistemas barrera-laguna, niveles eólicos antiguos, estuarios y marismas, sistemas playa-duna y acantilados sedimentarios.

Las lagunas costeras y sistemas barrera-laguna son masas de agua continentales poco profundas separadas del océano por una barrera sedimentaria, aunque en ocasiones, el cierre deriva de una elevación topográfica rocosa cubierta por sedimento, denominadas "lagunas colgadas" (*perched lakes*). Independientemente de la naturaleza del cierre, los sistemas barrera laguna están conectadas al océano, por lo menos intermitentemente, por una o más entradas restringidas. Además, pueden estar sujetas a la dinámica de las mareas, mientras que el nivel de salinidad varía desde condiciones de agua dulce hasta la hipersalinidad, según el equilibrio hidrológico (Kjerfve, 1994). Los sistemas barrera-laguna del NO peninsular se caracterizan por su reducido tamaño y escasa profundidad, con una importante componente estructural en su formación (González-Villanueva *et al.*, 2015). Costas (2006) y Costas *et al.* (2009) analizaron la evolución del sistema barrera-laguna de Rodas (Islas Cíes) durante los últimos 7.7 ka BP mediante el análisis de litofacies y datos palinológicos. Otro complejo sedimentario estudiado es el de Louro-Laguna das Xalfas (González-Villanueva *et al.*, 2009, 2015; Méndez Martínez *et al.*, 2011), situado en una pequeña bahía en el límite exterior de la ría de Muros y Noia, donde se aborda la configuración del sector y los cambios del nivel del mar

desde comienzos del Holoceno Medio. Entre las lagunas litorales colgadas (*perched lakes*) destacan las investigaciones realizadas en Doñiños (Santos *et al.*, 2001; Sáez *et al.*, 2018) y Traba (Devoy *et al.*, 1996; Alonso y Pagés, 2000, 2010; Bao *et al.*, 2007; Arribas *et al.*, 2010). Otros sistemas más abiertos y controlados por las mareas son los de Baldaio (Saa y Díaz-Fierros, 1985; Alonso y Pagés, 2007, 2010; Arribas *et al.*, 2010) y Corrubedo (Saa y Díaz-Fierros, 1985). También se deben incluir los estudios realizados sobre paleolagunas, hoy colmatadas o destruidas, como las de Pantín (Saa y Díaz-Fierros, 1985; Alonso y Pagés, 2010; Arribas *et al.*, 2010) o Sada (Alonso *et al.*, 2003; Alonso y Pagés, 2010).

Algunos autores identifican niveles de eolianitas y depósitos eólicos antiguos resultado del avance de los sistemas dunares remontantes durante las etapas transgresivas. En las islas Cíes, Arce-Chamorro *et al.* (2021, 2022a, 2022b, 2022c) definieron un episodio de sedimentación eólica durante el MIS-2 (*Marine Isotope Stage*), inducido por fuertes vientos costeros que permitieron la formación de dunas remontantes. También en estas islas, Martínez-Cortizas *et al.* (1996, 1997) analizaron el depósito eólico de Figueiras (isla de Monteagudo). El nivel paleodunar de punta Penaboa (A Coruña) está datado en 300 ka BP (Fernández-Mosquera *et al.*, 2007; Trindade *et al.*, 2013), por lo que su génesis se enmarcaría en el MIS-9, mientras Arce-Chamorro *et al.* (2022b) adscriben los depósitos de eolianitas de Bornalle y punta Langosteira al MIS-6 y MIS-5. Por último, Asensio Amor y González Martín (1987) identifican niveles eólicos antiguos, sin datar, sobre un nivel de terraza fluvio-marina, en la margen oriental de la ría de Ribadeo.

Los estuarios y marismas son zonas de deposición sedimentaria, convirtiéndolos en uno de los ambientes más ampliamente empleados para la investigación paleoambiental. En

caso de Galicia, la propia morfología de la costa y la elevada densidad de cursos fluviales favorecen su proliferación. Entre los sistemas estuarinos estudiados se encuentran los de los ríos: Miño (Leorri *et al.*, 2012; Moreno *et al.*, 2014), Miñor (Cano *et al.*, 1999; Nombela *et al.*, 2005; Pérez-Arlucea *et al.*, 2005; Méndez Martínez *et al.*, 2011), Lézor (Díaz-Fierros *et al.*, 1989), Ulla (Leiros y Guitián, 1983; Saa y Díaz-Fierros, 1983; Díaz-Fierros *et al.*, 1989), Mandeo (Asensio Amor y Grajal, 1983; Díaz-Fierros *et al.*, 1989; Leiros y Guitián, 1983; Alonso *et al.*, 2003; Alonso y Pagés, 2007, 2010), Baxoi (Alonso *et al.*, 2003; Alonso y Pagés, 2010; Arribas *et al.*, 2010), Eume (Asensio Amor y Grajal, 1983), las marismas de la ría de Ferrol (Alonso *et al.*, 2003; Alonso y Pagés, 2010) y el estuario del río Landro (Arribas *et al.*, 2010).

Las secuencias edafo-sedimentaria obtenidas en playas y sistemas playa-duna pueden reflejar con precisión los cambios en el nivel del mar, aunque habitualmente su potencia sedimentaria es más limitada. Estas secuencias son empleadas en numerosos estudios

paleoambientales, pero normalmente como parte de investigaciones centradas en otros ambientes, como los sistemas barrera-laguna. Entre los estudios llevados a cabo en playas y sistemas playa-duna, destacan los de Seselle (Santos y Vidal Romaní, 1993; Santos *et al.*, 1993), donde se identificó, bajo la playa actual, un nivel orgánico interpretado como una pequeña laguna costera, datada entre 4.4 ka BP y 3.9 ka BP. Bajo la playa de Ponzos (Alonso y Pagés, 2000, 2007; Gómez-Orellana *et al.*, 2021) también se identifican niveles orgánicos holocenos. En punta Pericos (Costa-Casais *et al.* 2012) analizan tres secuencias policíclicas (facies costeras, eólicas y continentales) situadas entre las playas de Couso y Area Basta, permitiendo reconstruir la evolución del sector desde 7.0 ka BP. Los estudios realizados en el islote Areoso (Figura 2b), situado en la parte interna de la ría de Arousa, permitieron diferenciar cuatro fases evolutivas del sector (continental, intermareal, playa-duna y eólica) desde el Holoceno Medio, relacionado dichos resultados con las variaciones del nivel del mar y la ocupación prehistórica del islote (Blanco-Chao *et al.*, 2017; Cajade-Pas-

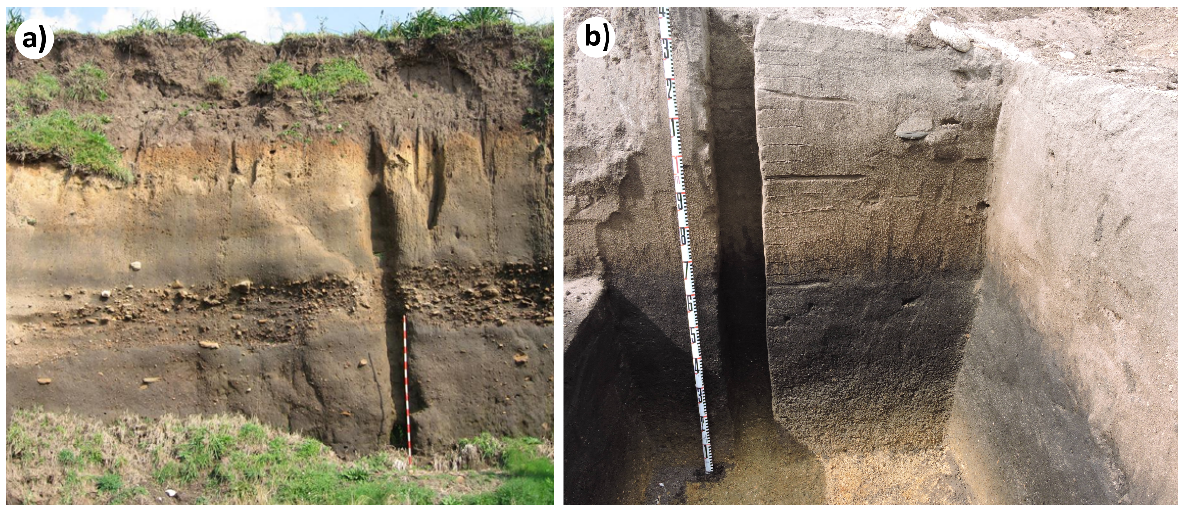


Figura 2: Ejemplos de depósitos edafo-sedimentarios estudiados en la costa gallega. a) Depósito de Caamaño (Ría de Muros e Noia. b) Depósito bajo la playa actual en el islote Areoso (Ría de Arousa).

Figure 2: Examples of edapho-sedimentary deposits studied on the Galician coast. a) Caamaño Deposit (Ría de Muros e Noia. b) Deposit under the current beach on the Areoso island (Ría de Arousa).

cual, 2024; Cajade-Pascual *et al.*, 2019, 2021, 2023). Otros sistemas playa-duna estudiados son los de Barrañán (Brosche, 1983), Corrubedo (Vilas *et al.*, 1986) y Ladeira (Clemente *et al.*, 2004; Barragán *et al.*, 2009). También se debe hacer mención a los estudios llevados a cabo en antiguos sistemas dunares en contornos actualmente urbanos, como los de Vigo (Martínez-Cortizas y Costa-Casais, 1997; Tallón-Armada *et al.*, 2013, 2015).

Los acantilados sedimentarios son el resultado de la interacción entre los procesos continentales y los costeros. Al tratarse de secuencias expuestas por la acción del mar, son formaciones de alto valor e interés de cara a el estudio paleoambiental. Existe un gran número de investigaciones realizadas a lo largo de la costa gallega. La costa sur, entre A Guarda y Baiona, se caracteriza por ser esencialmente rectilínea y estar flanqueada cara el este por un conjunto de sierras litorales. La morfología abrupta favoreció los procesos de ladera, fluvio-nivales y periglaciales, que fosilizaron la costa del MIS-5 durante la última glaciación (Blanco-Chao *et al.* 2003). Esta configuración permitió la acumulación de potentes depósitos por todo el sector, muchos de los cuáles fueron objeto de estudio (Saa, 1985; Cano *et al.*, 1997, 1999; Pérez-Alberti *et al.*, 1998b, 1998c; Blanco-Chao y Costa-Casais, 2001; Blanco-Chao *et al.*, 2002, 2009; Costa-Casais *et al.*, 2002, 2003, 2008; Costa-Casais y Caetano Alves, 2013). Entre los depósitos estudiados destacan los de Fedorento (Butzer, 1967; Brosche, 1982), Mougás (Nonn 1966; Franz, 1967; Brosche, 1982; Saa, 1985; Saa y Díaz-Fierros, 1988; Costa Casais *et al.*, 1996b; Gómez-Orellana *et al.*, 1998; Ramil-Rego *et al.*, 1998a, 1998b; Martínez-Cortizas *et al.*, 2009), Oia (Cano *et al.*, 1997, 1999; Costa-Casais, 2001; Costa-Casais *et al.*, 2003; Costa-Casais y Caetano Alves, 2013; Gómez-Orellana *et al.*, 2013; Blanco-Chao *et al.*, 2019) y Sanxián/Portocelo (Butzer, 1967; Franz, 1967; Cano *et al.*, 1997; Costa-Casais, 2001; Blanco-Chao *et*

al. 2003; Costa-Casais y Caetano Alves, 2013). En el área de las Rías Baixas hay estudios realizados en las rías de Vigo (Butzer, 1967; Franz, 1967), Pontevedra (Franz, 1967) y Arousa (de Jong y Poortman, 1970; Martínez-Graña *et al.*, 2000). En la ría de Muros y Noia destacan los depósitos de Fonferrón (Costa-Casais, 2001; Costa-Casais *et al.*, 2007), punta Ínsua (Alonso y Pagés, 2000, 2007) y especialmente Caamaño (Costa-Casais, 2001; Costa-Casais *et al.*, 1994, 2003, 2007; Pérez-Alberti *et al.*, 1998b, 1998c; Trenhaile *et al.*, 1999; Alonso y Pagés, 2000; Pérez-Alberti, 2000; Blanco-Chao *et al.*, 2002, 2009, 2019; Martínez-Cortizas *et al.*, 2009; Gómez-Orellana *et al.*, 2013). El depósito de Caamaño (Figura 2a), situado en el margen meridional de la ría de Muros y Noia, cuenta con una potencia de 6 a 8 m. En la actualidad presenta una dinámica regresiva, exhumando geoformas costeras antiguas. El depósito se asienta sobre la plataforma litoral y está compuesto de muro a techo por facies de origen costero, eólico y continental, que representan la evolución ambiental del sector durante los últimos 40.0 ka BP. La base del depósito se corresponde con un nivel de paleoplaya, situado unos 3 m por encima del nivel del mar actual, formado posiblemente durante el último interglaciario (Trenhaile *et al.*, 1999). Otro trabajo realizado en el sector es el de Costa-Casais *et al.* (1996a), donde se analizan las diferentes tipologías de depósitos entre los cabos Corrubedo y Fisterra. Entre Fisterra y el golfo Ártabro existen numerosos ejemplos de acantilados sedimentarios analizados. Alonso y Pagés (2000, 2007) definen los niveles sedimentarios a lo largo de todo este sector costero. Al sur de Muxía se encuentra el depósito de Arnela, compuesto por facies costeras, eólicas y continentales de hasta 40.0 ka BP, acumulados sobre una plataforma del MIS-5e (Pérez-Alberti *et al.*, 1998c, 1999; Costa-Casais, 2001; Blanco-Chao *et al.*, 2002, 2003). Más al norte, Brosche (1983) y Franz (1967) estudiaron los depósitos situados en la playa de Barrañán (Arteixo). Mien-

tras que Nieto Freire y Vidal Romaní (1989) identifican una serie de terrazas marinas en el sector comprendido entre los cabos Prioriño y Prior. En el sector cantábrico de Galicia también se encuentran ejemplos de investigaciones paleoambientales realizadas en acantilados sedimentarios como los de Area Longa/Fazouro (Saa y Díaz-Fierros, 1988; Alonso y Pagés, 2000, 2007; Gómez-Orellana *et al.*, 2007), Cangas de Foz (Brosche, 1983), Nois (Alonso y Pagés, 2000, 2007), Perdouro (Copa Novo y Asensio Amor, 1987) y Reinante (Barral Silva *et al.*, 1985). Asensio Amor (1985) y Asensio Amor y González Martín (1987) identifican una serie de terrazas marinas en diferentes enclaves de la ría de Ribadeo. Entre los depósitos más estudiados de este sector de la costa cantábrica destacan los de punta Gallín (Feal-Pérez, 2012; Feal-Pérez *et al.*, 2009, 2011, 2014). Se trata de una pequeña ensenada ubicada al oeste de Ribadeo, cuya arquitectura edafo-sedimentaria permitió interpretar su evolución desde el último interglaciar.

4. Las cronologías de las facies edafo-sedimentarias

La cronología de los depósitos de la costa gallega se restringe al período Cuaternario. Aunque algunas formaciones paleodunares han sido adscritas al Pleistoceno Medio, como los de punta Penaboa (Fernández-Mosquera *et al.*, 2007; Trindade *et al.*, 2013) y Bornalle (Arce-Chamorro *et al.*, 2022b), las facies edafo-sedimentarias más antiguas se corresponden a niveles costeros atribuidos al último período interglaciar. Fechas correspondientes al MIS-5e se han obtenido mediante OSL (*Optical Stimulated Luminescence*) en niveles eólicos de Cíes y punta Langosteira (Arce-Chamorro *et al.*, 2022b) y en una terraza costera localizada en Sanxenxo (Pérez-Alberti *et al.*, 2018). Algunos niveles cementados, situados sobre el nivel del mar actual, han sido interpretados como paleoplayas del MIS-5e, como

en el caso de Caamaño (Trenhaile *et al.*, 1999; Blanco-Chao *et al.*, 2002, 2003), pero sin que hayan sido datados hasta el momento. Alonso y Pagés (2007) identifican paleoplayas elevadas datadas en el MIS-5a (85.0 - 74.0 ka BP), pero cuya cronología, obtenida también por OSL, es puesta en entredicho por los propios autores.

Este limitado marco cronológico mejora a partir de ca. 40.0 ka BP, donde se incrementa progresivamente el número de dataciones debido, en parte, a la posibilidad de emplear métodos de datación por radiocarbono. Las facies identificadas correspondientes al final del Pleistoceno son principalmente de naturaleza continental (Fig. 3), derivada de la dinámica de ladera y periglaciación durante las condiciones glaciares y un nivel del mar inferior al actual (Costa-Casais, 2001; Costa-Casais *et al.*, 2003, 2008). Aparecen a lo largo de toda la costa fosilizando, en muchos casos, formas costeras heredadas (playas, plataformas litorales, acantilados, cuevas, etc.). El sector de la costa sur, entre A Guarda y Baiona concentra un importante número de secuencias edafo-sedimentarias, donde se identifican niveles de material grueso intercalados con paleosuelos. Los procesos más importantes en su génesis son los nivales y periglaciares, conformando acumulaciones gelifluidales y solifluidales, compuestas por cantos y arenas en una matriz arcillo-limosa (Costa-Casais *et al.*, 2002; Costa-Casais y Caetano Alves, 2013, 2015). En el depósito de Mougás (Fig. 3) se han datado diferentes facies continentales entre 39.5 ka BP (Butzer, 1967) y 6.0 ka BP (Costa-Casais *et al.*, 1996b). En depósitos cercanos como Oia o San Xián se identifican facies similares entre 35.0 ka BP y 25.0 ka BP (Costa-Casais y Caetano Alves, 2013; Blanco-Chao *et al.*, 2019). En el resto de la costa gallega también se han caracterizado ejemplos de facies continentales, como en los depósitos de Caamaño, Arnela y punta Gallín. En Caamaño se han datado niveles de acumulación periglaciación, con abundan-

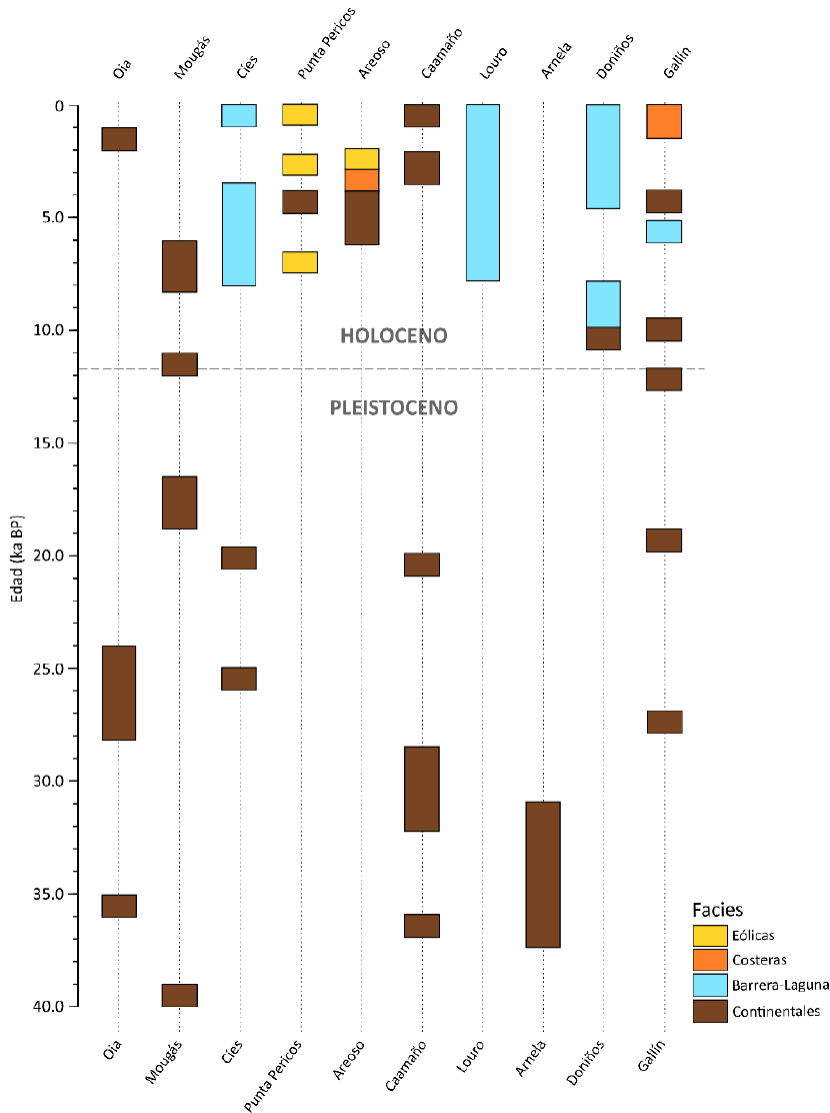


Figura 3: Tipología y cronología de los depósitos seleccionados. Las facies continentales incluyen niveles fluvio-nivales, periglaciares, coluviales y ambientes húmedos no costeros. Las facies barrera-laguna engloban las secuencias obtenidas en sistemas barrera-laguna y lagunas costeras. Las facies costeras identifican sedimentos de playa o sistemas playa-duna. Las facies eólicas se corresponden con dunas y mantos eólicos. Referencias de las dataciones: Oia (Costa-Casais y Caetano Alves, 2013), Mougás (Nonn, 1966; Butzer, 1967; Franz, 1967; Costa-Casais *et al.*, 1996b; Costa-Casais y Caetano Alves, 2013), Cíes (Costas *et al.*, 2009), punta Pericos (Costa-Casais *et al.* 2012), Areoso (Cajade-Pascual *et al.*, 2023; Cajade-Pascual, 2024), Caamaño (Trenhaile *et al.*, 1999; Blanco-Chao *et al.*, 2003, 2019), Louro (González-Villanueva *et al.*, 2009, 2015), Arnela (Costa-Casais *et al.*, 2001; Blanco-Chao *et al.*, 2003), Doniños (Sáez *et al.*, 2018) y Gallín (Feal-Pérez, 2012; Feal-Pérez *et al.*, 2014).

Figure 3: Typology and chronology of the selected deposits. The continental facies include fluvio-nival, periglacial, colluvial and humid non-coastal environments. The barrier-lagoon facies include the sequences obtained in barrier-lagoon systems and coastal lagoons. Coastal facies identify beach sediments or beach-dune systems. The aeolian facies correspond to dunes and aeolian mantles. Dating references: Oia (Costa-Casais y Caetano Alves, 2013), Mougás (Nonn, 1966; Butzer, 1967; Franz, 1967; Costa-Casais y Caetano Alves, 2013; Costa-Casais *et al.*, 1996b), Cíes (Costas *et al.*, 2009), punta Pericos (Costa-Casais *et al.* 2012), Areoso (Cajade-Pascual *et al.*, 2023; Cajade-Pascual, 2024), Caamaño (Trenhaile *et al.*, 1999; Blanco-Chao *et al.*, 2003, 2019), Louro (González-Villanueva *et al.*, 2009, 2015), Arnela (Costa-Casais *et al.*, 2001; Blanco-Chao *et al.*, 2003), Doniños (Sáez *et al.*, 2018) y Gallín (Feal-Pérez, 2012; Feal-Pérez *et al.*, 2014).

te material grueso, de entre 36.0 ka BP y 20.0 ka BP (Trenhaile *et al.*, 1999; Blanco-Chao *et al.*, 2003); mientras en Arnela, facies similares han sido fechadas entre el 38.0 ka BP y 31.0 ka BP (Costa-Casais *et al.*, 2001; Blanco-Chao *et al.*, 2003). En punta Gallín, localizada en el extremo NE de la costa gallega, también se identifican niveles periglaciares en 27.5 ka BP y en 19.0 ka BP (Feal-Pérez, 2012).

La identificación de facies similares a lo largo de la costa gallega son evidencias de las condiciones frías acontecidas durante el período glaciario, donde los procesos morfogenéticos periglaciares y de ladera fosilizaron la costa correspondiente al MIS-5e. La mejoría climática durante el tardiglaciario y posteriormente durante el Holoceno, supuso un cambio desde una sedimentación periglaciario dominante, a una fundamentalmente de naturaleza coluvial. Estas facies coluviales se identifican en los niveles superiores de Mougás (Franz, 1967; Costa-Casais *et al.*, 1996b), Oia (Costa-Casais y Caetano Alves, 2013; Blanco-Chao *et al.*, 2019) y Caamaño (Trenhaile *et al.*, 1999; Blanco-Chao *et al.*, 2019); mientras que en punta Gallín también se han identificado entre el 12.0 ka BP y el 4.8 ka BP (Feal-Pérez, 2012). En el islote Areoso se han identificado niveles coluviales y paleosuelos (6.3 ka BP a 4.6 ka BP) bajo los niveles costeros (Cajade-Pascual *et al.*, 2023; Cajade-Pascual, 2024). Mientras que en punta Pericos la sedimentación coluvial (4.0 ka BP) se relaciona con un empeoramiento de las condiciones climáticas durante la Neoglaciación (Costa-Casais *et al.*, 2012).

La subida del nivel del mar durante la transgresión posglaciario se identifica a partir del Holoceno, donde diferentes depósitos evidencian el cambio de las condiciones continentales hacia las costeras. La formación y evolución de los sistemas barrera-laguna y lagunas litorales colgadas (*perched lakes*) ejemplifican la configuración de la costa sedimen-

taria durante la fase final de la transgresión, con niveles del mar cercanos a los actuales. Las fechas más antiguas obtenidas en el complejo de barrera-laguna de Cíes (25.6 ka BP y 20.0 ka BP) han sido interpretadas como un sedimento orgánico formado en un ambiente lacustre de agua dulce, alejado de la influencia costera. La presencia de un cierre rocoso impidió la inundación de la laguna por el mar hasta el 3.6 ka BP, aunque el sistema ya presentaba una configuración similar a la actual (Costas *et al.*, 2009). Con una cronología similar, la reconstrucción paleoambiental realizada en Louro, permite interpretar la evolución de sistema barrera-laguna desde el 8.0 ka BP hasta el presente (González-Villanueva *et al.*, 2009, 2015). En Doniños, se identifica un paleosuelo en la base de la sedimentación, datado en 10.2 ka BP, sobre el que se desarrolla un sistema barrera-laguna, con un hiato sedimentario entre 8.0 ka BP y 4.5 ka BP (Sáez *et al.*, 2018). En Traba, también se han identificado facies similares entre 5.6 ka BP y 0.5 ka BP (Bao *et al.*, 2007). Con un menor nivel de detalle, Alonso y Pagés (2010) enmarcan la configuración de lagunas costeras y sectores intermareales en la subida del nivel del mar durante el Holoceno Medio y Superior. También han sido interpretados como facies de *lagoon* los niveles orgánicos (4.3 - 3.9 ka BP) identificados en Seselle (Santos y Vidal Romaní, 1993) y punta Gallín (5.5 ka BP) (Feal-Pérez, 2012). Aunque la evolución de estos sistemas cerrados o semicerrados está muy condicionada por la topografía y la configuración del sector (González-Villanueva *et al.*, 2015; Sáez *et al.*, 2018), parece existir una cierta correlación cronológica entre su formación entre 9.0 - 7.0 ka BP y una estabilización del nivel del mar en cotas semejantes a las actuales posterior al 4.0 ka BP. En este sentido, las secuencias edafo-sedimentarias analizadas en el islote Areoso, señalan el cambio entre una sedimentación continental a facies costeras a partir del 4.0 ka BP, verificándose una estabilización en las cotas actuales entre

3.5 ka BP y el 3.2 ka BP (Cajade-Pascual *et al.*, 2023; Cajade-Pascual, 2024). También han sido datados sedimentos intermareales (4.5 - 0.8 ka BP) en Baldaio, Miño, Ferrol y Ortigueira (Alonso y Pagés, 2010). Entre las facies costeras estudiadas se deben incluir las crestas de tormenta identificadas por Feal-Pérez *et al.* (2014) en punta Gallín, desde 1.6 ka BP hasta el siglo XX. Muchas de las facies costeras (playa) y continentales están cubiertas por facies eólicas, dependiendo de la disponibilidad de sedimento. En Areoso, las facies costeras están fosilizadas por niveles claramente identificados como eólicos datados en torno a 2.0 ka BP (Cajade-Pascual *et al.*, 2023; Cajade-Pascual, 2024). Con una cronología semejante, Alonso y Pagés (2007) identifican un nivel dunar en Paizás (3.0 ka BP). En punta Pericos, se han datado diferentes episodios de sedimentación eólica desde el 7.0 ka BP (Costa-Casais *et al.* 2012). Otras facies eólicas datadas se corresponden con cordones y cierres dunares de sistemas barrera-laguna como Louro (González-Villanueva *et al.*, 2009, 2015) y Doniños (Sáez *et al.*, 2018).

5. El potencial de los depósitos edafo-sedimentarios de la costa gallega como archivo paleoambiental

La costa gallega presenta una elevada densidad de depósitos edafo-sedimentarios, configurándose como uno de los elementos distintivos del paisaje costero de Galicia. Estas geoformas son uno de los mejores exponentes de los cambios ambientales ocurridos en el pasado, permitiendo reconstruir la evolución paleoambiental de este territorio desde el Pleistoceno hasta la actualidad. Esta comprensión es esencial para ayudar a interpretar los cambios futuros (Costa-Casais *et al.*, 2008, 2021; Costa-Casais y Caetano Alves, 2015). Los procesos y las condiciones ambientales que generaron los depósitos pueden estar inactivas o ser diferentes a las actuales, por lo que su interés no es tanto por lo que son

en el presente, como por lo que fueron en el pasado (Urquí, 2014). A pesar de su singularidad, la erosión marina, en un contexto global de aumento del nivel del mar, sumada a los impactos antrópicos, ponen en riesgo su conservación. La destrucción de estas morfologías supone la pérdida de su valor científico y educativo, que debe ser preservado para las generaciones futuras. Por ello, su consideración como patrimonio natural debe ser el primer paso para garantizar su conservación y protección (Costa-Casais y Domínguez-Almansa, 2018; Domínguez-Almansa *et al.*, 2019; Cajade-Pascual *et al.*, 2021), siendo su inclusión en la Lista de Lugares de Interés Geológicos (LIGs) una de las primeras medidas adoptadas (Costa-Casais y Caetano Alves, 2013, 2015). En este sentido, los depósitos de la costa sur se configuran como elemento central del LIG *Costa de A Guarda-Baiona, entre Cabo Silleiro y la desembocadura del río Miño* (GM090); mientras que en el LIG *Ría de Muros-Noia* (GM046) se encuentran algunos de los mejores ejemplos de depósitos edafo-sedimentario de acantilado activo, donde se incluyen los de Fonferrón y Caamaño.

El gran número de depósitos estudiados a lo largo de la costa gallega, así como la alta resolución temporal de alguno de ellos, han permitido diferenciar los principales cambios ambientales desde el Pleistoceno Final. En las últimas décadas el estudio paleoambiental de los depósitos edafo-sedimentarios costeros ha incluido un número creciente de *proxies* en la investigación (arqueológicos, sedimentológicos, paleontológicos, palinológicos, texturales, geoquímicos, diatomeas, foraminíferos, etc.), cuyos resultados han sido analizados y discutidos desde una perspectiva interdisciplinar, lo que ha mejorado considerablemente la interpretación paleoambiental. La generalización y mejora de los métodos de datación absoluto (principalmente radiométricos y por luminiscencia) han otorgado un marco cronológico cada vez más comple-

to. No obstante, existen controversias sobre muchas de las cronologías obtenidas por OSL, especialmente en las referidas a los niveles eólicos y eolianitas pleistocenas y a los niveles costeros elevados del MIS-5a identificados por Alonso y Pagés (2000, 2007). Para el Holoceno, la principal discrepancia se relaciona con la interpretación de los niveles costeros y su relación con la transgresión holocena. Aunque existe cierto consenso sobre una reducción de las tasas de ascenso a partir del 8.0 - 7.0 ka BP, se mantiene diferencias interpretativas y cronológicas significativas sobre el momento en el que el nivel del mar habría alcanzado unas cotas semejantes a las presentes (Cajade-Pascual, 2024), siendo este un aspecto fundamental para el análisis de la configuración costera actual y su adaptación a los posibles escenarios futuros. También hay discrepancias en lo referente a las principales fases o eventos paleoclimáticos, como pueden ser el Óptimo Climático del Holoceno, la Neoglaciación o el Período Cálido Romano, especialmente en su relación con posibles pulsaciones del nivel del mar. La falta de secuencias edafo-sedimentarias largas (Alonso y Pagés, 2000) continúa dificultando el establecimiento de un marco evolutivo de mayor resolución. De hecho, existen rangos cronológicos amplios y numerosos hiatos interpretativos, haciendo necesario proseguir con su estudio, a la vez que se implementan nuevas metodologías y técnicas de investigación.

6. Conclusiones

Los depósitos edafo-sedimentarios son morfologías de acumulación con un elevado valor como archivos del pasado. Aunque la investigación paleoambiental comenzó a mediados del siglo XX, el número de investigaciones ha aumentado considerablemente durante las últimas décadas. En la costa gallega se han estudiado depósitos en sistemas barrera-laguna y lagunas costeras, ambientes estuarinos, sistemas playa-duna, acantilados

sedimentarios e incluso sobre niveles eólicos antiguos. Si bien se ha establecido un marco evolutivo desde el Pleistoceno Final, todavía existen hiatos interpretativos y discrepancias a la hora de dilucidar ciertas fases o cambios ambientales. La cronología pleistocena es limitada y en algunos casos, es objeto de debate. Para el Holoceno se cuenta con un mayor número de dataciones, pero se mantienen importantes divergencias tanto en las condiciones paleoclimáticas como en la configuración de la costa actual. La revisión bibliográfica de los estudios realizados en depósitos de la costa gallega evidencia el importante papel de los factores locales en su configuración, siendo un aspecto fundamental para la interpretación de los resultados obtenidos. En este sentido, muchas de las divergencias interpretativas son consecuencia de la vinculación de los cambios en las facies a pulsaciones del nivel del mar o a variaciones climáticas significativas cuando, en realidad, son resultado principalmente de cambios morfodinámicos a escala local. También se debe señalar una aparente dicotomía entre la evolución de la fachada atlántica y la cantábrica, aunque el limitado número de secuencias estudiadas en el sector cantábrico gallego dificulta la identificación de posibles variaciones regionales. La investigación paleoambiental de los depósitos costeros presenta un elevado interés científico y didáctico, no obstante, su consideración como patrimonio natural todavía es muy limitada entre la sociedad y las administraciones públicas, haciendo necesario su puesta en valor y su conservación.

Bibliografía

- Alonso, A., Pagés, J.L. (2000). El registro sedimentario del final del Cuaternario en el litoral noroeste de la Península Ibérica. Márgenes cantábrico y atlántico. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 23 (1), 17-29.
- Alonso, A., Pagés, J.L., López García, M.J., Cearreta, A. (2003). Cronoestratigrafía de la transgre-

- sión holocena en el Golfo Ártabro (La Coruña, NO de España). En Flor, G. (Ed.), *Actas de la XI Reunión Nacional del Cuaternario* (pp. 33-38). Asociación para el Estudio del Cuaternario.
- Alonso, A., Pagés, J.L. (2007). Stratigraphy of Late Pleistocene coastal deposits in northern Spain. *Journal of Iberian Geology*, 33(2), 207-220.
- Alonso, A., Pagés, J.L. (2010). Evolución del nivel del mar durante el Holoceno en el Noroeste de la Península Ibérica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 23(3-4), 157-167.
- Arce-Chamorro, C., Vidal-Romaní, J.R., Sanjurjo-Sánchez, J. (2021). Islas Cíes: una trampa eólica en la Ría de Vigo (Galicia, España) al final del último glaciar. *Geogaceta*, 70, 7-10. <https://doi.org/10.55407/geogaceta102257>
- Arce-Chamorro, C., Vidal Romaní, J.R., Grandal d'Anglade, A., Sanjurjo Sanchez, J. (2022a). Aeolization on the Atlantic coast of Galicia (NW Spain) from the end of the last glacial period to the present day: Chronology, origin and evolution of coastal dunes linked to sea-level oscillations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(1), 198-214. <https://doi.org/10.1002/esp.5481>
- Arce-Chamorro, C., Vidal-Romaní, J.R., Sanjurjo-Sánchez, J. (2022b). Chronology of Four Climbing Dune Outcrops on the Atlantic Coast of Galicia (NW Spain) Linked to the Sea Level Fall during the MIS6 and MIS4 Isotopic Stages. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(3), 312. <https://doi.org/10.3390/jmse10030312>
- Arce-Chamorro, C., Vidal-Romaní, J.R., Sanjurjo-Sánchez, J. (2022c). New Model of Coastal Evolution in the Ria de Vigo (NW Spain) from MIS2 to Present Day Based on the Aeolian Sedimentary Record. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1350. <https://doi.org/10.3390/jmse10101350>
- Arribas, J., Alonso, Á., Pagés, J.L., González-Acebrón, L. (2010). Holocene transgression recorded by sand composition in the mesotidal Galician coastline (NW Spain). *The Holocene*, 20(3), 375-393. <https://doi.org/10.1177/0959683609353429>
- Asensio Amor, I. (1985). Conexión entre terrazas prelitorales y litorales en las proximidades del límite galaicoastur. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 9, 321-328. <http://hdl.handle.net/2183/5945>
- Asensio Amor, I., Grajal, M. (1983). La dinámica fluvio-marina en los estuarios del Mandeo y Eume. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 6, 219-233. <http://hdl.handle.net/2183/6341>
- Asensio Amor, I., González Martín, J.A. (1987). Síntesis de procesos geomorfológicos en el límite galaicoastur. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 11, 103-111. <http://hdl.handle.net/2183/5976>
- Asensio Amor, I., González Martín, J.A. (1992). Síntesis de procesos periglaciares en Galicia (España). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 17, 7-12. <http://hdl.handle.net/2183/6121>
- Bao, R., Alonso, A., Delgado, C., Pagés, J.L. (2007). Identification of the main driving mechanisms in the evolution of a small coastal wetland (Traba, Galicia, NW Spain) since its origin 5700 cal yr BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247(3-4), 296-312. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.10.019>
- Barragán, T., Francés, G., Pérez-Arlucea, M. (2009). Asociación de foraminíferos bentónicos holocenos del complejo de la Ramallosa (Rías Baixas, NW de la Península Ibérica). *Paleolusitana*, 1, 93-96.
- Barral Silva, M.T., Guitián Rivera, F., Guitián Ojea, F. (1985). Estudio sedimentológico de un depósito arenoso de la rasa Cantábrica. Aplicación de la exoscopia del cuarzo. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 9, 329-347. <http://hdl.handle.net/2183/5913>
- Berot, P. y Solé, L. (1954). Recherches morphologiques dans le NO de la Péninsule Ibérique. *Etudes et Mémoires CNRS*, IV, 9-61.
- Blanco-Chao, R. (2019). Beaches of Galicia. En J.A. Morales (Ed.), *The Spanish Coastal Systems: Dynamic Processes, Sediments and Management* (pp. 189-207). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93169-2_9
- Blanco-Chao, R., Costa-Casais, M. (2001). Influencia de formas y depósitos antiguos en la dinámica litoral: un ejemplo de la costa sur de Pontevedra (Galicia). En *Actas del XVII Congreso de Geógrafos Españoles: Oviedo, noviembre de 2001* (pp. 137-140). Universidad de Oviedo.

- Blanco-Chao, R., Costa-Casais, M., Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A., Vázquez-Paz, M. (2002). Holocene evolution on Galician coast (NW Spain): an example of paraglacial dynamics. *Quaternary International*, 93, 149-159. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00013-7)
- Blanco-Chao, R., Costa-Casais, M., Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A., Trenhaile, A.S. (2003). Evolution and inheritance of a rock coast: western Galicia, northwestern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(7), 757-775. <https://doi.org/10.1002/esp.496>
- Blanco-Chao, R., Feal-Pérez, A., Valcárcel, M., Costa-Casais, M., Pérez-Alberti, A. (2009). Retrocesos en acantilados sedimentarios de la costa Atlántica Gallega durante los últimos 3500 años. En J. Morales, M. Cantano, A. Rodríguez, I. Delgado (Eds.), *Nuevas contribuciones sobre Geomorfología litoral* (pp. 55-58). Universidad de Huelva. <http://hdl.handle.net/10261/54603>
- Blanco-Chao, R., Costa-Casais, M., Taboada, T., Tallón-Armada, R. (2017). Sedimentología y cambios del nivel del mar en el islote Guidoiro Areoso, Ría de Arousa, NO de la Península Ibérica. *Geotemas*, 17, 103-106.
- Blanco-Chao, R., Costa-Casais, M., Cajade-Pascual, D., Gómez-Rey, G. (2019). Coastal retreat and sedimentation during the last 3000 years. Atlantic coast of NW Spain. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 331. <https://doi.org/10.3390/jmse7100331>
- Brosche, K.U. (1982). Studien zu jungpleistozänen und holozänen Sedimenten und fossilen Böden im Küstengebiet von West-Galizien (NW-Spanien). *E&G Quaternary Science Journal*, 32(1), 63-80. <https://doi.org/10.3285/eg.32.1.06>
- Brosche, K.U. (1983). Die geomorphologisch-bodengeographische Deutung der pleistozänen Sedimente und der fossilen Böden an der Playa de Baranán (westl. La Coruna) und bei Cangas de Foz (Nord-Galizien). *E&G Quaternary Science Journal*, 33(1), 95-117. <https://doi.org/10.3285/eg.33.1.08>
- Butzer, K.W. (1967). Geomorphology and Stratigraphy of the Paleolithic Site of Budino (Prov. Pontevedra, Spain). *E&G Quaternary Science Journal*, 18, 82-103. <https://doi.org/10.3285/eg.18.1.04>
- Cajade-Pascual, D. (2024). Morfodinámica, Reconstrucción paleoambiental e Xestión do Illote Areoso (Ría de Arousa). Tesis Doctoral. Universidade de Santiago de Compostela]. <http://hdl.handle.net/10347/33042>
- Cajade-Pascual, D., Costa-Casais, M., Blanco-Chao, R. (2019). Ascenso del nivel del mar y cambios ambientales costeros durante el Holoceno Final. Islote Areoso, Ría de Arousa. En R. Durán, L. Guillén, G. Simarro (Eds.), *X Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 261-264). CSIC-Institut de Ciències del Mar. <http://hdl.handle.net/10347/23262>
- Cajade-Pascual, D., Costa-Casais, M., Blanco-Chao, R. (2021). Spatial evolution and archaeological contextualization through holocene edapho-sedimentary deposits: Areoso island (NW Spain). En H. Pina, F. Martins, L. Dias Oliveira (Eds.), *The Overarching Issues of the European Space. From Sustainable Development to Sustainability* (pp. 390-399). Faculdade de Letras da Universidade do Porto. <http://hdl.handle.net/10347/30722>. <https://doi.org/10.21747/978-989-9082-08-3/overa27>
- Cajade-Pascual, D., Costa-Casais, M., Blanco-Chao, R., Taboada, T. (2023). Sea-level change and human occupation over 6000 years on Areoso Island (Ría de Arousa, NW Iberian Peninsula). *Environmental Earth Sciences*, 82(11), 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10955-7>
- Cano, J., Fumanal, M.P., Ferrer, C., Usera, J., Blázquez, A.M., Olmo, J. (1997). Evolución de la costa meridional de Galicia durante el Cuaternario superior. *Cuaternario Ibérico*, 33-46.
- Cano, J., Fumanal, M.P., Ferrer, C., Usera, J., Blázquez, A.M., Olmo, J. (1999). Evolution of the meridional coast of Galicia during the Upper Quaternary. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 43, 521-540. <https://doi.org/10.1127/zfg/43/1999/521>
- Cartelle, V., García-Moreiras, I., Martínez-Carreño, N., Sobrino, C.M., García-Gil, S. (2022). The role of antecedent morphology and changing sediment sources in the postglacial palaeogeographical evolution of an incised valley: The sedimentary record of the Ría de Arousa (NW Iberia). *Global and Planetary Change*,

- 208, 103727. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103727>
- Clemente, F., Pérez-Arlucea, M., Alejo, I., Francés, G., González, D., Nombela, M., Méndez, G. (2004). La transgresión holocena en la Ría de Vigo (Rías Baixas, Galicia): registro sedimentario en la zona costera. *GeoTemas*, 6(4), 207-210.
- Copa Novo, J.R., Asensio Amor, I. (1987). Comportamiento y evolución de cuarcitas areniscosas en acumulaciones detríticas. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 11, 21-30. <http://hdl.handle.net/2183/5987>
- Costa-Casais, M. (2001). *Análise sedimentaria e reconstrucción paleoambiental da costa atlántica de Galicia*. Tesis doctoral, Universidade de Santiago de Compostela. <http://hdl.handle.net/10261/40071>
- Costa-Casais, M., Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A. (1994). Caracterización de un depósito costero de la Ría de Muros-Noia (La Coruña, Galicia). En J. Arnáez, J. M. García, A. Gómez (Eds.), *Geomorfología en España. III Reunión Nacional de Geomorfología* (Tomo I, pp. 355-368). <http://hdl.handle.net/10261/54556>
- Costa-Casais, M., Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A. (1996a). Tipo de depósitos costeros antiguos entre o cabo de Fisterra e o cabo de Corrubedo. En A. Pérez-Alberti, P. Martini, W. Chesworth, A. Martínez-Cortizas (Eds.), *Dinámica y evolución de medios cuaternarios* (pp. 417-430). Consellería de Cultura, Xunta de Galicia.
- Costa-Casais, M., Moares, C., Martínez-Cortizas, A. (1996b). Caracterización fisicoquímica do depósito de Mougás (Pontevedra): Implicacións morfoxenéticas. En A. Pérez-Alberti, P. Martini, W. Chesworth, A. Martínez-Cortizas (Eds.), *Dinámica y evolución de medios cuaternarios* (pp. 431-440). Consellería de Cultura, Xunta de Galicia.
- Costa-Casais, M., Pérez-Alberti, A., Blanco-Chao, R. (2002). Depósitos coluviales de origen nival en la costa sur de Pontevedra (Galicia): facies y procesos deposicionales. En E. Serrano, A. García de Celis, J. C. Guerra, C. G. Morales, M. T. Ortega (eds.), *Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología: Patrimonio, Montaña y Dinámica Territorial* (pp. 539-546). Sociedad Española de Geomorfología. <http://hdl.handle.net/10261/54562>
- Costa-Casais, M., Blanco Chao, R., Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A. (2003). Factores determinantes en la sedimentación de los depósitos antiguos en la costa occidental de Galicia. En R. Blanco-Chao, J. López-Bedoya, A. Pérez-Alberti (Eds.), *Procesos geomorfológicos y evolución costera* (pp. 295-305). Universidade de Santiago de Compostela.
- Costa-Casais, M., Blanco-Chao, R., Pérez-Alberti, A. (2007). Evolución de la costa de la ría de Muros y Noia. En A. Pérez-Alberti, R. Blanco-Chao, P. Carrera, M. Costa-Casais, J. López-Bedoya, P. Martini, M. Valcárcel (Eds.), *Itinerarios geomorfológicos por Galicia* (pp. 65-100). Grupo de Investigacións Xeomorfolóxicas e Ambientais.
- Costa-Casais, M., Blanco Chao, R., Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A. (2008). Los episodios Heinrich en la costa de Galicia (NW de la Península Ibérica). Un análisis a través de los sedimentos continentales. *Territoris*, 7, pp. 39-53. <http://hdl.handle.net/10261/54548>
- Costa-Casais, M., Martínez-Cortizas, A., Pontevedra-Pombal, X., Berasategui Vinagre, I., Ferro-Vázquez, M.C., Rodríguez Racedo, J. (2012). Evolución holocena do sector costeiro de Punta dos Pericos (Ribeira, A Coruña). En R. Fábregas-Valcarce, C. Rodríguez-Rellán (Eds.), *A Arte Rupestre no Norte do Barbanza* (pp.153-172). Andavira. <http://hdl.handle.net/10261/140267>
- Costa-Casais, M., Caetano Alves, M.I. (2013). Geological heritage at risk in NW Spain. Quaternary deposits and landforms of "Southern Coast" (Baiona-A Garda). *Geoheritage*, 5, 227-248. <https://doi.org/10.1007/s12371-013-0083-7>
- Costa-Casais, M., Caetano Alves, M.I. (2015). Otra visión del patrimonio geológico: la puesta en valor de los depósitos cuaternarios de la costa galega (NW España). En A. Hilaro, M. Mendia, M. Monge-Ganuzas, E. Fernández, J. Vegas, A. Belmonte (Eds.), *Patrimonio geológico y geoparques, avances de un camino para todos* (Vol. 18, pp. 125-130). Instituto Geológico y Minero de España. <https://hdl.handle.net/1822/39369>

- Costa-Casais, M., Domínguez-Almansa, A. (2018). Posta en valor dos depósitos edafo-sedimentarios cuaternarios do litoral galego (NE Península Ibérica): unha perspectiva dende a educación patrimonial. En R. Blanco-Chao, F. Castillo, J. Horacio, M. Valcácel (Eds.), *Xeomorfoloxía e Paisaxes Xeográficas. Catro décadas de investigación e ensino. Homenaxe a Augusto Pérez Alberti* (pp. 115-138). Universidade de Santiago de Compostela.
- Costa-Casais, M., Domínguez-Almansa, A., Caja-de-Pascual, D. (2021). Scientific Knowledge, Education and Dissemination of the Quaternary Deposits in the Galician Coast (NW Spain). En G. Lozano, J. Luengo, A. Cabrera, J. Vega (Eds.), *Building connections for global geoconservation. X International ProGEO Symposium* (pp. 129-130). Instituto Geológico y Minero de España.
- Costas, S. (2006). *Evolución morfosedimentaria anual, decadal y secular del sistema barrera-lagoon de Cíes durante el Cuaternario (Galicia, NO Península Ibérica)*. Tesis doctoral, Universidade de Vigo.
- Costas, S., Muñoz Sobrino, C., Alejo, I., Pérez-Arlucea, M. (2009). Holocene evolution of a rock-bounded barrier-lagoon system, Cíes Islands, northwest Iberia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(11), 1575-1586. <https://doi.org/10.1002/esp.1849>
- Dabrio, C.J. (2010). Playas. En A. Arche (Ed.), *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (pp.15-51). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
- Delibrias, G., Nonn, H., Vancampo, M. (1964) Age et flore d'un dépôt périglaciaire reposant sur la «rasa» cantabrique près de Burela (Galice). Espagne. *Comptes rendus hebdomadaires des seances de l' Academie des Sciences*, 259, 4092-4094.
- Devoy, R.J.N., Delaney, C., Carter, R.W.G., Jennings, S.C. (1996). Coastal stratigraphies as indicators of environmental changes upon European Atlantic coasts in the Late Holocene. *Journal of Coastal Research*, 564-588. <https://www.jstor.org/stable/4298506>
- Díaz-Fierros, F., Benito, E., Saa, P. (1989). Estudio e interpretación paleoecológica de los análisis de polen de las marismas de Galicia. En *El Cuaternario en España y Portugal. Actas de la II reunión del Cuaternario Ibérico* (pp. 191-199). Instituto Geológico y Minero de España.
- Domínguez-Almansa, A., Costa-Casais, M., López-Facal, R. (2019). Educar parareconocer: apropiación patrimonial de los depósitos cuaternarios del litoral gallego por estudiantes de Magisterio. *Revista Electrónica Interuniversitaria de Formación del Profesorado*, 22(1), 57-70. <https://doi.org/10.6018/reifop.22.1.357591>
- Feal-Pérez, A. (2012). *Evolución morfodinámica y procesos actuales en costas rocosas*. Tesis doctoral, Universidade de Santiago de Compostela]. <http://hdl.handle.net/10347/4046>
- Feal-Pérez, A., Blanco-Chao, R., Valcárcel, M. (2009). Influencia de formas y procesos heredados en la evolución reciente y en los procesos morfodinámicos actuales en un sector de costa rocosa: Punta Gallín, costa cantábrica gallega. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 22(1-2), 67-78.
- Feal-Pérez, A., Blanco-Chao, R., Ferro-Vázquez, M.C., Costa-Casais, M., Martínez-Cortizas, A. (2011). Implicaciones morfodinámicas de un proceso de construcción de crestas de tormenta en el NW de la Península Ibérica. En I. Montoya, I. Rodríguez, M.J. Sánchez (Eds.), *Avances en Geomorfología Litoral. Actas de las VI Jornadas de Geomorfología Litoral* (pp. 51-54). Universidad Rey Juan Carlos. <http://hdl.handle.net/10261/54620>
- Feal-Pérez, A., Blanco-Chao, R., Ferro-Vázquez, M.C., Martínez-Cortizas, A., Costa-Casais, M. (2014). Late-Holocene storm imprint in a coastal sedimentary sequence (Northwest Iberian coast). *The Holocene*, 24(4), 477-488. <https://doi.org/10.1177/0959683613520257>
- Fernández-Mosquera, D., Vidal-Romaní, J.R., Sanjurjo-Sánchez, J., Granja, H. (2007). Cronología por OSL del eólico costero y evolución del nivel del mar en el NW ibérico durante el Cuaternario Superior. En J. Lario, P.G. Silva (Eds.), *Contribuciones al estudio del periodo cuaternario* (pp. 185-186). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.
- Franz, H. (1967). Beiträge zur Kenntnis der Beodententwicklung in NW-Spanien auf fossiler Boden. *Anales de Edafología Agrobiología*, 26, 33-51. <http://hdl.handle.net/10261/216012>
- García-Moreiras, I. (2017). Cambios climáticos y ambientales durante la transición Pleistoceno-

- no-Holoceno Nuevos datos palinológicos procedentes de las Rías Baixas (NO Ibérico). Tesis doctoral, Universidade de Vigo. <http://www.preinvestigo.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/924>
- Gibbard, P.L., West, R.G. (2000). Quaternary chronostratigraphy: the nomenclature of terrestrial sequences. *Boreas*, 29(4), 329-336. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2000.tb01214.x>
- Gibbard, P.L., Lewin, J. (2016). Partitioning the quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 151, 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.08.033>
- Gómez-Orellana, L., Ramil-Rego, P., Muñoz Sobrino, C. (1998). Una nueva secuencia polínica y cronológica para el depósito pleistoceno de Mougás (NW de la Península Ibérica). *Revue de Paléobiologie*, 17, 35- 47.
- Gómez-Orellana, L., Ramil-Rego, P., Muñoz Sobrino, C. (2007). The Würm in NW Iberia, a pollen record from Area Longa (Galicia). *Quaternary Research*, 67(3), 438-452. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.01.003>
- Gómez-Orellana, L., Ramil-Rego, P., Muñoz Sobrino, C. (2013). The response of vegetation at the end of the last glacial period (MIS 3 and MIS 2) in littoral areas of NW Iberia. *Boreas*, 42(3), 729-744. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2012.00310.x>
- Gómez-Orellana, L., Ramil-Rego, P., Ferreiro da Costa, J., Muñoz Sobrino, C. (2021). Holocene environmental change on the Atlantic coast of NW Iberia as inferred from the Ponzos wetland sequence. *Boreas*, 50(4), 1131-1145. <https://doi.org/10.1111/bor.12535>
- González-Villanueva, R., Pérez-Arlucea, M., Alejo, I., Goble, R. (2009). Climatic-related factors controlling the sedimentary architecture of a Barrier-Lagoon complex in the context of the Holocene transgression. *Journal of Coastal Research*, 627-631. <https://www.jstor.org/stable/25737653>
- González-Villanueva, R., Pérez-Arlucea, M., Costas, S., Bao, R., Otero, X.L., Goble, R. (2015). 8000 years of environmental evolution of barrier-lagoon systems emplaced in coastal embayments (NW Iberia). *The Holocene*, 25(11), 1786-1801. <https://doi.org/10.1177/0959683615591351>
- de Jong, J. D., Poortman, H. H. (1970). Coastal sediments of the southeastern shores of the Ría de Arosa (Galicia, NW Spain). *Leidse Geologische Mededelingen*, 37(1), 147-167. <https://repository.naturalis.nl/pub/505629>
- Kjerfve, B. (1994). Coastal lagoons. In *Elsevier oceanography series* (Vol. 60, pp. 1-8). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(08\)70006-0](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(08)70006-0)
- Leiros, M.C., Guitián, F. (1983). Suelos de la zona húmeda española. XI. Contribución al estudio de los suelos hidromorfos de Galicia. 2. Suelos continentales. *Anales de edafología y agrobiología* 42(3-4), 427- 461.
- Leorri, E., Fatela, F., Drago, T., Bradley, S.L., Moreno, J., Cearreta, A. (2012). Lateglacial and Holocene coastal evolution in the Minho estuary (N Portugal): Implications for understanding sea-level changes in Atlantic Iberia. *The Holocene*, 23(3), 353-363. <https://doi.org/10.1177/0959683612460786>
- Martí, A., Taboada, J., Royé, D., Fonseca, X. (2019). *Os tempos e o clima de Galicia*. Edicións Xerais de Galicia, Vigo.
- Martín-González, F., Heredia, N. (2011). Geometry, structures and evolution of the western termination of the Alpine-Pyrenean Orogen relief (NW Iberian Peninsula). *Journal of Iberian Geology*, 37(2), 103-120. https://doi.org/10.5209/rev_JIGE.2011.v37.n2.1
- Martínez-Catalán, J.R., Aller, J., Alonso, J.L., Bastida, F. (2009). The Iberian variscan orogen. In *Spanish geological frameworks and geosites: an approach to spanish geological heritage of international relevance* (pp. 13-27). Instituto Geológico y Minero de España.
- Martínez-Cortizas, A. (2000). La reconstrucción de paleoambientes cuaternarios: ideas y ejemplos. *Estudios do Quaternário*, 3, 31-41. <https://doi.org/10.30893/eq.v0i3.28>
- Martínez-Cortizas, A., Costa-Casais, M., López-Sáez, J.A. (1996). Niveles dunares pleistocenos y holocenos en la costa de Galicia: Hipótesis cronológica en base a su grado de edafización. En A. Pérez-Alberti, P. Martini, W. Chesworth, A. Martínez-Cortizas (Eds.), *Dinámica y evolución de medios cuaternarios* (pp. 391-404). Consellería de Cultura, Xunta de Galicia.
- Martínez-Cortizas, A., Costa-Casais, M. (1997). Indicios de variaciones del nivel del mar

- en la ría de Vigo durante los últimos 3000 años. *Gallaecia*, 16, 23-47. <http://hdl.handle.net/10261/54522>
- Martínez-Cortizas, A., Otero, X.L., Costa-Casais, M. (1997). Edafogénesis cuaternaria del depósito dunar de Figueiras (Islas Cíes-NW España): implicaciones paleoambientales. *NACC: Nova Acta Científica Compostelana*, 7, 121-135.
- Martínez-Cortizas, A., Pérez-Alberti, A. (1999). *Atlas climático de Galicia*. Xunta de Galicia.
- Martínez-Cortizas, A., Costa-Casais, M., López-Sáez, J.A. (2009). Environmental change in NW Iberia between 7000 and 500 cal BC. *Quaternary International*, 200(1-2), 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.07.012>
- Martínez-Graña A., Goy, J.L., Zazo, C. (2000). Actividad tectónica en el Noroeste Peninsular, en base a los registros de los depósitos costeros de los últimos 130.000 años (rías Arosa-Pontevedra, Galicia). *Geotemas*, 1(4), 263-266.
- Méndez Martínez, G., Pérez-Arlucea, M., González-Villanueva, R., Ovejero Campos, A. (2011). Anthropogenic influence on the Holocene sedimentation process along the Atlantic coast of Galicia (NW Iberian Peninsula). *Journal of Coastal Research*, 1788-1792. <https://www.jstor.org/stable/26482484>
- Mensching, H. (1961) Die rias Galicisch Asturischen Küste Spaniens. *Erdkunde*, 15. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.1961.03.05>
- Moreno, J., Fatela, F., Leorri, E., José, M., Pereira, I., Araújo, M.F., Conceição, M., Reide, D., Medeiros, A. (2014). Marsh benthic Foraminifera response to estuarine hydrological balance driven by climate variability over the last 2000 yr (Minho estuary, NW Portugal). *Quaternary Research*, 82(2), 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.04.014>
- Nieto Freire, M., Vidal Romaní, J.R. (1989). Niveles marinos y depósitos continentales antiguos en el borde costero entre Cabo Prior y Cabo Prioriño (A Coruña, Galicia). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 14, 67-78. <http://hdl.handle.net/2183/6053>
- Nombela, M.A., Alejo, I., Bernárdez, P., Clemente, F., Costas, S., Diz, P., Fernández-Bastero, S., Francés, G., Gago-Duport, L., García, T., González-Alonso, D., González-Álvarez, R., González-Villanueva, R., Liqueste, C., Pena, L.D., Pérez-Arlucea, M. (2005). Evolución sedimentaria desde el último máximo glacial en la costa y plataforma continental de las Rías Baixas (Galicia, NW de la Península Ibérica). En M.C. Freitas, T. Drago (Eds.), *Iberian Coastal Holocene Paleoenvironmental Evolution: Coastal Hope 2005 Conference*. <http://hdl.handle.net/10400.9/2804>
- Nonn, H. (1966). *Les régions cotières de la Galice (Espagne). Étude géomorphologique*. Tesis doctoral, L'Université de Strasbourg.
- Pérez-Alberti, A. (2000). Geomorfología y reconstrucción paleoambiental. *Estudos do Quaternário/Quaternary Studies*, 3, 21-30. <https://doi.org/10.30893/eq.v0i3.26>
- Pérez-Alberti, A. (2001). Análisis geomorfológico y evolución paleoclimática de Galicia durante el Terciario y el Cuaternario. En L. Guitián Rivera, A. Pérez-Alberti (Eds.) *Semata 13: Historia Ecológica de Galicia* (pp. 11-66). Universidade de Santiago de Compostela.
- Pérez-Alberti, A. (2021). Sobre el origen de las rías gallegas: Viejas teorías y nuevas reflexiones. En L. Gómez-Pujol, F.X. Roig-Munar, B. Gelabert y J.A. Martín Prieto (Eds.), *De la terra a la mar i de la mar a la terra. Homenatge a Antonio Rodríguez-Perea* (pp. 149-164). Societat d'Història Natural de les Balears.
- Pérez-Alberti, A., Blanco-Chao, R., Costa-Casais, M. (1997). La importancia de los balances de acumulación/erosión y fosilización/exhumación en la evolución geomorfológica de la costa de Galicia. En *Dinámica Litoral-Interior* (Vol. I, pp. 205-219). Asociación de Geógrafos Españoles e Universidade de Santiago de Compostela.
- Pérez-Alberti, A., Blanco-Chao, R., Costa-Casais, M., Vázquez-Paz, M. (1998a). Formas litorales heredadas en costas rocosas de Galicia. En A. Gómez-Ortiz, F. Salvador Franch (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología Española* (pp 333-340). Universitat de Barcelona
- Pérez-Alberti, A., Costa-Casais, M., Blanco-Chao, R. (1998b). Depósitos sedimentarios antiguos en la costa atlántica gallega: tipología, localización y área fuente. Un análisis comparativo. En A. Gómez-Ortiz, F. Salvador Franch (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología Española* (pp 341-346). Universitat de Barcelona. <http://hdl.handle.net/10261/54559>

- Pérez-Alberti, A., Costa-Casais, M., Blanco-Chao, R. (1998c). L'importance des processus d'origine froide sur la côte atlantique de la Galice (Nord-Ouest de la Péninsule Ibérique). *Environnements periglaciaires*, 5(23), 21-32.
- Pérez-Alberti, A., Costa-Casais, M., Martínez-Cortizas, A. (1999). Nuevas aportaciones al conocimiento del Cuaternario reciente en la costa atlántica de Galicia. En *Geoarqueología cuaternari litoral: memorial María Pilar Fumanal* (pp. 381-390). Universitat de Valencia.
- Pérez-Alberti, A., Blanco-Chao, R., Otero, M., Macías-García, I., López-Bedoya, J., Valcarcel-Díaz, M. (2009). Cambios ambientales detectados na costa de Galicia durante o Plistoceno e Holoceno e dinámica actual. En V. Pérez-Muñuzuri, M. Fernández Cañamero, J. L. Gómez Gesteira (Coord.), *Evidencias e impactos do cambio climático en Galicia* (pp. 425-454). Xunta de Galicia.
- Pérez-Alberti, A., Cunha, P.P., Pérez, X.O. (2018). La terraza costera de Sanxenxo: un registro sedimentario del MIS 5 a MIS 2, en la Ría de Pontevedra (NO de la Península Ibérica). En P.P. Cunha, J. Dias, H. Veríssimo, L.V. Duarte, P. Dinis, F.C. Lopes, A.F. Bessa, J.A. Carmo (Eds.), *Proceedings of the IX Symposium on the Iberian Atlantic Margin* (pp. 4-7). Universidade de Coimbra.
- Pérez-Arlucea, M., Méndez, G., Clemente, F., Nombela, M., Rubio, B., Filgueira, M. (2005). Hydrology, sediment yield, erosion and sedimentation rates in the estuarine environment of the Ria de Vigo, Galicia, Spain. *Journal of Marine Systems*, 54(1-4), 209-226. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2004.07.013>
- Pérez-Estaún, A., Bea, F., Bastida, F., Marcos, A., Martínez-Catalán, J.R., Martínez-Poyatos, D., Arenas, R., Díaz-García, F., Azor, A., Simancas, J.F., González-Lodeiro, F. (2004). La Cordillera Varisca europea: el Macizo Ibérico. En J.A. Vera (Ed.), *Geología de España* (pp. 21-25). SGE-IGME.
- Pirazzoli P.A. (1996). *Sea-Level Changes. The Last 20000 Years*. Chichester: Wiley.
- Ramil-Rego, P., Muñoz-Sobrino, C., Rodríguez-Guitián, M., Gómez-Orellana, L. (1998a). Differences in the vegetation of the North Iberian Peninsula during the last 16,000 years. *Plant Ecology*, 138(1), 41-62. <https://doi.org/10.1023/A:1009736432739>
- Ramil-Rego, P., Rodríguez-Guitián, M., Muñoz-Sobrino, C. (1998b). Sclerophyllous vegetation dynamics in the north of the Iberian peninsula during the last 16,000 years. *Global Ecology & Biogeography Letters*, 7(5), 335-351. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.1998.00300.x>
- Saa, M.P. (1985). *Contribución a la cronología de sedimentos costeros por análisis polínico*. Tesis doctoral, Universidade de Santiago de Compostela.
- Saa, M.P., Díaz-Fierros, F. (1983). Análisis polínico de un sedimento de tipo Marsh en la Marisma de Catoira (Pontevedra). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 5, 191-204. <http://hdl.handle.net/2183/5827>
- Saa, M.P., Díaz-Fierros, F. (1985). Análisis polínico de tres lagunas litorales colmatadas de Galicia. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 10, 95-111. <http://hdl.handle.net/2183/5952>
- Saa, M.P., Díaz-Fierros, F. (1988). Contribución al estudio paleobotánico mediante análisis de pólen. *Estudios geológicos*, 44(3-4), 339-349. <https://doi.org/10.3989/egcol.88443-4551>
- Sáez, A., Carballeira, R., Pueyo, J.J., Vázquez-Loureiro, D., Leira, M., Hernández, A., Valero-Garcés, B.L., Bao, R. (2018). Formation and evolution of back-barrier perched lakes in rocky coasts: An example of a Holocene system in north-west Spain. *Sedimentology*, 65(6), 1891-1917. <https://doi.org/10.1111/sed.12451>
- Santos, L., Vidal Romaní, J.R. (1993). El lagoon de Seselle: Un episodio de la transgresión Holocena en la Ría de Ares (A Coruña, Galicia, España). Datos geomorfológicos, sedimentarios y paleoecológicos. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 18, 163-174. <http://hdl.handle.net/2183/6158>
- Santos, L., Bao, R., Jalut, G. (1993). Estudio micro-paleontológico de una turbera litoral holocena en la Ría de Ares (A Coruña, España). *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe*, 18, 175-188. <http://hdl.handle.net/2183/6154>
- Santos, L., Bao, R., Sanchez Goñi, M. (2001). Pollen record of the last 500 years from the Doninos coastal lagoon (NW Iberian Peninsula): changes in the pollinic catchment size versus paleoecological interpretation. *Journal of Coas-*

- tal Research*, 17, 705-713. <https://www.jstor.org/stable/4300221>
- Tallón-Armada, R., Costa-Casais, M., Taboada, T., Martínez-Cortizas, A. (2013). Reconfiguración de la línea de costa en un sector de explotación salinera de época romana en el NO de España. *Geotemas*, 14, 211-214.
- Tallón-Armada, R., Costa-Casais, M., Taboada, T. (2015). Evolución de un sector costero durante la Alta Edad Media en el NW de la Península Ibérica. *Estudos do Quaternário/Quaternary Studies*, (12), 27-38. <http://hdl.handle.net/10347/24155>
- Trenhaile, A.S., Pérez-Alberti, A., Martínez-Cortizas, A., Costa-Casais, M., Blanco-Chao, R. (1999). Rock coast inheritance: an example from Galicia, northwestern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(7), 605-621. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199907\)24:7<605::AID-ESP977>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199907)24:7<605::AID-ESP977>3.0.CO;2-1)
- Trindade, M.J., Prudêncio, M.I., Sanjurjo-Sánchez, J., Vidal-Romaní, J.R., Ferraz, T., Mosquera, D.F., Dias, M.I. (2013). Post-depositional processes of elemental enrichment inside dark nodular masses of an ancient aeolian dune from A Coruña, Northwest Spain. *Geologica Acta: an international earth science journal*, 11(2), 231-244. <http://hdl.handle.net/10400.9/2092>
- Urquí, L.C. (2014). Guía Práctica para entender el patrimonio geológico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 22(1), 5-18.
- Vilas, F., Ramos, A., Sopeña, A., Rey, L., Nombela, M.A. (1986). El complejo de playa-lagoon de Corrubedo y los submedios característicos. Galicia, NW. España. *Acta geológica hispánica*, 21-22, 233-243. <http://hdl.handle.net/10261/6932>
- Walker, M., Berkelhammer, M., Björck, S., Cwynar, L.C., Fisher, D.A., Long, A.J., Lowe, J.J., Newnham R.M., Rasmussen, S.O., Weiss, H. (2012). Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science*, 27(7), 649-659. <https://doi.org/10.1002/jqs.2565>

Recibido el 22 de mayo de 2024

Aceptado el 5 de julio de 2024



Investigating soil erosion vulnerable zones based on clustered geoinformatics approach: a case study of Tyume River Catchment, Eastern Cape, South Africa

Investigación de las zonas vulnerables a la erosión del suelo basada en un enfoque geoinformático agrupado: un estudio de caso de la cuenca del río Tyume, Cabo Oriental, Sudáfrica

Mbatyoti, S.^{(a)*}; Sumner, P.^(a); Kalumba, A. M.^(a,b); Owolabi, S. T.^(c); Belle, J. A.^(c)

(a) Department of Geography and Environmental Sciences, Faculty of Science and Agriculture, University of Fort Hare, Private Bag X1314, Alice, 5700, Eastern Cape, South Africa.

(b) Geospatial Application, Climate Change and Environmental Sustainability Lab—GACCES, University of Fort Hare, Private Bag X1314, Alice 5700, Eastern Cape Province, South Africa.

(c) Disaster Management Training and Education Centre for Africa, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, University of the Free State.

* styoti85@gmail.com; Tel.: +27-81-490-6068

Abstract

Rigorous field surveys, environmental specificity, and data paucity hamper detailed soil erosion assessments, model selection, ecological monitoring, and prioritization against soil erosion. To address this in a topographically complex environment, the present study presents a novel selection of physiographic factors integrated geospatially with the land use/cover and geology data to prioritize the soil erosion vulnerable areas within a watershed, using Tyume River Catchment, Eastern Cape, South Africa as a case study. A quantitative morphometric analysis involving parameters such as the drainage density, topographic wetness index, terrain ruggedness index, topographic position index, and vector roughness measure was computed using a digital elevation model based on their inference of watershed's morphogenetic response to anthropic factors and pluviometric processes. Based on expert judgment for thematic ranking and weightage, the soil erosion prioritization area map was generated through weighted overlay analysis of the morphometric parameters with land use land cover and surficial lithology themes. The results depicted a catchment-scale soil erosion vulnerability map, classified into very high (40 km²), high (135 km²), medium (209 km²), low (186 km²), and non-vulnerable (113 km²) zones. Using Google Earth image analyses through the coefficient of determination ($R^2 = 0.563$) and Receiver Operating Characteristics Curve (AUC = 0.899), the model corroboration indicated that the soil erosion vulnerability assessment is reliable and highly predictive. The study identified free-range animal operation and hillslope overgrazing, especially in riparian zones, as the environmental practices ag-



gravate the catchment's terrain susceptibility to soil erosion. The assessment showed that some of the selected morphometric parameters could be used to improve the validated soil erosion models in mountainous regions. Due to the high precision of the engaged approach and the identified environmental concerns, the method can be adopted in similar environments.

Key words: Landscape indices, Soil erosion, Vulnerability, Morphometric analysis, South Africa.

Resumen

El exhaustivo trabajo de campo, la especificidad medioambiental y la escasez de datos dificultan las evaluaciones detalladas de la erosión del suelo, la selección de modelos, el seguimiento ecológico y la priorización de la lucha contra la erosión del terreno. Para abordar este problema en un entorno topográficamente complejo, el presente estudio presenta una nueva selección de factores fisiográficos integrados geoespacialmente con los datos de uso / cobertura de la tierra y geología para priorizar las zonas vulnerables a la erosión del suelo dentro de una cuenca hidrográfica, aplicado a la cuenca del río Tyume, Sudáfrica como un estudio de caso. Se calculó un análisis morfométrico cuantitativo que incluía parámetros como la densidad de drenaje, el índice de humedad topográfica, el Índice de rugosidad del terreno, el indicador de la posición topográfica y la medida de rigidez del vector, utilizando un modelo de elevación digital basado en su inferencia de la respuesta morfogenética de la capa de agua a los factores antropogénicos y los procesos pluviométricos. Sobre la base del juicio de expertos para la clasificación temática y la ponderación, se generó el mapa de prioridad de la erosión del suelo a través de un análisis ponderado de la superposición de los parámetros morfométricos con la cobertura de las tierras de uso de la tierra y las capas de la litología superficial. El resultado mostró un mapa de la vulnerabilidad a la erosión del suelo a escala de cuenca, clasificado en zonas muy altas (40 km²), altas (135 km²), medianas (209 km²), bajas (186 km²) y no vulnerables (113 km²). Utilizando los análisis de imágenes de Google Earth a través del coeficiente de determinación ($R^2 = 0,563$) y la curva de características operacionales del receptor (AUC = 0,899), la corroboración del modelo indicó que la evaluación de la vulnerabilidad a la erosión del suelo es fiable y altamente predictiva. El estudio identificó la explotación extensiva de animales y el sobrepastoreo de las colinas, particularmente en las zonas ribereñas, ya que las prácticas ambientales agravan la susceptibilidad del terreno de la cuenca a la erosión del suelo. La evaluación mostró que algunos de los parámetros morfométricos seleccionados podrían utilizarse para mejorar los modelos validados de erosión del suelo en las regiones montañosas. Debido a la alta precisión del enfoque empleado y las afecciones ambientales identificadas, el método puede adoptarse en entornos similares.

Palabras clave: Índices de paisaje, Erosión del suelo, Vulnerabilidad, Análisis morfométrico, Sudáfrica.

1. Introducción

Soil erosion is a severe environmental concern due to its detrimental effect on ecological productivity, soil hydrological processes, and the threat to the landscape's viability for agriculture (He *et al.*, 2024). Currently, soil erosion research has become relevant on the local and international agendas to address ongoing stream siltation, streamflow reduction, water resources pollution, and the abatement of water infrastructure functionality (Martín-

ez-Murillo *et al.*, 2011; DWS, 2017; Schillaci *et al.*, 2023). For example, dam sedimentation has rendered several large dams in the Eastern Cape of South Africa inefficient (DWS, 2017; Basson *et al.*, 2022), leading to a rise in water and food insecurity. Soil erosion has led to increased land abandonment, endangering ecological services, the conservation of natural resources, and the sustainability of the environment globally (Sibiya *et al.*, 2023; Shtober-Zisu *et al.*, 2024). Globally, one-eighth of the world's population is at risk due to land

degradation, while one-quarter are directly affected (Smith *et al.*, 2020). In the last ten years, land degradation and soil erosion have caused more than 80,000 km² of farmland to lose about 10 to 40 tons/hectare due to land degradation and soil erosion in the recent decade (Hladky *et al.*, 2017) while the rate of soil loss was noted to be twice the rate of soil formation annually (Parwada and Van Tol, 2016). Consequently, the erosion of the topsoil layer will become a severe environmental issue, especially in regions sensitive to climate change (Owolabi and Belle, 2023).

The vulnerability of soil to erosion in South Africa is high due to the effect of climate change, slope steepness, soil/geologic type, and increased extent of change of land use/cover (Owolabi *et al.*, 2022). This study undertakes an integrated assessment of land degradation by soil erosion driven by water at a catchment scale. Many soil erosion models have been developed to monitor and evaluate the extent and potential impacts of water soil erosion, such as Universal Soil Loss Equation (USLE) (Wischmeier and Smith, 1978; Helmi, 2023), Water Erosion Prediction Project (WEPP) (Flanagan and Nearing, 1995; Ugwu *et al.*, 2024), Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold *et al.*, 1998; Aloui *et al.*, 2023), and European Soil Erosion Model (EUROSEM) (Morgan *et al.*, 1998; Busico *et al.*, 2023). The proposition of several soil erosion models is mainly due to the variation in geohydrological processes and watershed response due to the varying physiographic factors influencing terrain susceptibility to soil erosion. Hence, the USLE was modified to Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) (Renard *et al.*, 1991) and subsequently modified to Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) for site-specific soil loss estimation (Mhangara *et al.*, 2012). However, most models are data-intensive, requiring rigorous field assessment for soil samples, terrain in-situ testing, and extensive field coverage,

which could be unsafe, labor-intensive, costly, timeous, and require detailed laboratory assessment. However, the local climatic activities, geohydrological processes, soil intrinsic properties, and land cover change effects are depicted on the morphogenetic imprints of the watershed, which can be easily mapped through quantitative morphometric analysis (Bhatt and Ahmed, 2014; Jadidoleslam *et al.*, 2019; Deribew *et al.*, 2024; Vieira and Oyguc, 2024). As a result, this study presents an integrated morphometric-based approach to address the gap in model-site specificity.

Increasing awareness of terrain and morphometric characteristics has helped improve watershed management (Bhatt and Ahmed, 2014). Morphometric parameter (MPs) analysis provides information on the soil surface conditions, soil thickness (Deribew *et al.*, 2024), and fluid/ moisture transfer function associated with runoff production (Jadidoleslam *et al.*, 2019). Terrain information drawn from MPs includes drainage density (DD), topographic wetness index (TWI), terrain ruggedness index (TRI), topographic position index (TPI), and vector roughness measure (VRM). TWI models the influence of hillslope factors on soil water transport (Zhang *et al.*, 2024), and TRI projects the areas of high potential for overland flow (high TRI) and depressions (low TRI) (Amatulli *et al.*, 2020). TPI calibrates the runoff-contributing areas within a watershed (Avand *et al.*, 2022). VRM computes the relative positions of geomorphic incisions influenced by gravity, soil surface condition, and hydrographic network (Smith, 2014). DD depicts the drainage areas with high susceptibility to detachment when combined with other soil/ terrain parameters (Jadidoleslam *et al.*, 2019). MPs have been unilaterally adopted and hybridized with a land use/ land cover map using a multi-criteria classifier to prioritize areas of soil erosion (Haokip *et al.*, 2022). The effectiveness of MPs can be improved by integrating its themes with signif-

icant land use/ cover (LU/C) features and geology, thereby addressing the research gap on the relevant geomorphic-based soil erosion models in terrain with complex topography. As a result, the study proposed a Soil Erosion Potential Area (SEPA) model based on the weighted overlay computation of themes of five MPs with a land use/ cover map and surficial lithology themes guided by expert decisions drawn from extensive qualitative literature review and content analysis to score the relative erosional influence of the selected themes. The proposition of SEPA is motivated by Sharma's (2010) selection of morphometric parameters (3), TWI, slope length factor, and stream power index, alongside an inverted NDVI, which are integrated using overlay analysis after ISODATA clustering. SEPA computation is based on the conventional approach of the multi-parametric decision method expressed as a weighted linear combination in Pal (2016) and Ghosh and Lepcha (2019) soil erosion studies. The geospatial-assisted delineations of the environments involving multi-parametric decision-making have been widely adopted in other environmental studies such as groundwater exploitation (Hasanuzzaman *et al.*, 2022; Dimple *et al.*, 2023), landslide investigation (Arumugam *et al.*, 2023), and wildfire studies (Djabri *et al.*, 2023), as conceptualized in SEPA computation here. To this end, the study is outlined to address the following research questions; (a) Can a soil erosion model mainly based on morphometric assessment among others, provide a reliable qualitative vulnerability assessment? (b) What are the convent factors driving soil erosion in a topographic domain.

The research aims to present an integrated framework model of soil erosion assessment based on the analysis of geo-morphometric parameters, land use/cover, and geological factors in the Tyume River Basin. The study is addressed using two central objectives, which include: (1) the geospatial mapping and inte-

gration of Tyume river basin morphometric parameters with land use/cover and geology themes, and (2) a critical investigation of the ground situation aided by Google Earth for thorough visualization and erosion proneness estimation for soil erosion model corroboration using receiver operating curves and confusion matrices to enhance the qualitative interpretation of areas vulnerable to soil erosion. By presenting this geomorphic-based integrated approach, this study contributes to the body of knowledge on the suitability of MPs in optimizing soil erosion models in areas with complex topography.

2. Materials and methods

2.1. Description of the study area

The Tyume River catchment covers an area of 642.37 km² and an altitudinal range of 308 - 1826 m.a.s.l. (Figure 1). The catchment is located at the headwater of Keiskamma watershed, in Amathole municipality, Eastern Cape, South Africa. It has an average winter temperature of 11°C which ranges between -4°C and 15°C in the winter (Jun-Jul-Aug), and an average summer temperature of 20°C which ranges between 17°C and 38°C in summer (Dec-Jan-Feb). The catchment is characterized by a mean annual rainfall of 450 mm – 600 mm, with extreme rainfall experienced at the higher altitudes where the terrain topography possibly influences the rainfall at the north section of the Tyume (Owolabi *et al.*, 2021a). The mean monthly discharge of Tyume River ranges from 8.11 to 33.41 m³/s with the highest in March and the lowest in July while the mean annual discharge is estimated at 235 m³/s using the last 44 years streamflow data. Tyume River is 75 km long and runs southward from the Hogsback State Forest at the north, through Alice, the center, and several rural settlements to the outlet where it confluences into the Keiskamma River, the tertiary catchment at the south,

where Tyume catchment positions as a head-water (Figure 1).

The landform in the Tyume basin can be classified as sub-range hilly terrain at the extreme north as a part of the Great Escarpment and flanking the west-northwest-north-northeast-east and the peneplain that depresses to the foothill in the south (Dijkshoorn *et al.*, 2008). The catchment is geologically underlain by the dominant Tatarian arenaceous argillites of Balfour Formation, the subordinate Kazanian Light Grey sandstone of Middleton Formation at the extreme South, and the Scythian argillaceous arenites of Katberg Formation, with the Beaufort Group and the Karoo Supergroup (Owolabi *et al.*, 2021b). The dominant soil fractions are Calcic Vertisols at the north, Calcaric Regosols at the center, and coarse deposits in the south (Dijkshoorn *et al.*, 2008). The natural vegetation of the area is classified into three significant biomes: dense forest (north extreme at Hogsback), savanna (center to the west), and tropical thicket (center to the east and south). Visual inspection within the terrain and Google Earth inspection showed vivid evidence of onsite effect of soil erosion, degenerating into a badlands while the offsite effects were manifested through periodic siltation of Tyume River and sedimentation at the plain by the south of the catchment.

2.2. Data sourcing and pre-processing

A digital elevation model (DEM) with a 30 m by 30 m resolution, provided by the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) and the Landsat 8 Operation Land Imager (OLI) data were downloaded from the USGS Earth Explorer website (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) and the geology map obtained from Council for Geoscience Studies (CGS). The winter month OLI (July 2019) was selected due to low rainfall intensity, wind speed, and cloud cover, enabling a quality raster's spec-

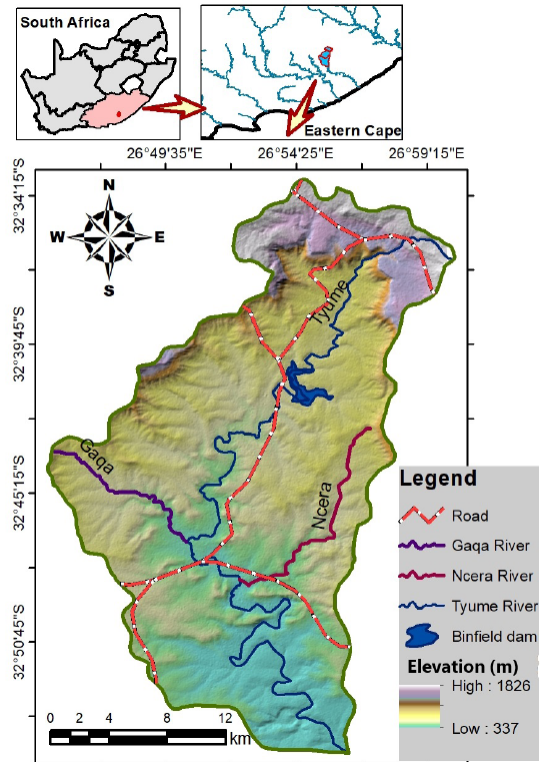


Figure 1. Tyume River basin showing the main river valley, Tyume tributaries, and elevation.

Figura 1. Cuenca del río Tyume que muestra el valle principal del río, los afluentes del Tyume y la elevación.

tral reflectance. The DEM was pre-processed to avoid radiometric errors and ensure atmospheric correction in PCI Geomatica 2015. Data relevant to geology, anthropic factors, and pluviometric information such as the drainage density (DD), topographic wetness index (TWI), topographic position index (TPI), and terrain ruggedness index (TRI), vector roughness measure (VRM) were clipped or computed.

Each layer was qualitatively classified after collating the input data layers by assigning the relative weighting values to each unit factor based on field knowledge (Google Earth inspection) and literature. A priority zoning based on the relative significance of factors influencing soil erosion by water in the study terrain was used to develop a rating system to

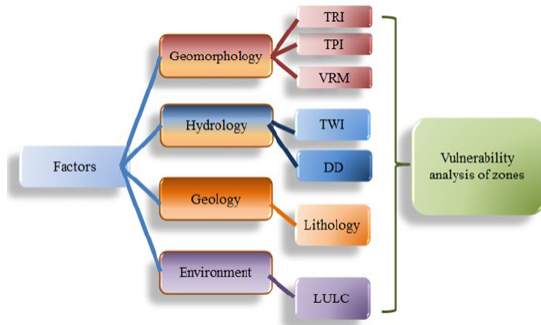


Figure 2. Classification scheme for the projected Topographic Wetness Index (Owolabi *et al.*, 2020).

Figura 2. Esquema de clasificación para el Índice de Humedad Topográfica proyectado (Owolabi *et al.*, 2020).

ensure a qualitative map combination (Sarkar and Kanungo, 2004). The approach engaged in this study may be specific to a complex terrain such as found in Hogsback escarpment of South Africa. The methodology involved factors selection, data clustering in a GIS platform, computation of soil erosion potential zones, and corroboration of the vulnerability map and the DEM data by ground-truthing. The study was further corroborated using Google Earth scenery mapping in Google Earth Pro software (Farhan and Nawaiseh, 2015), coefficient of determination, and receiver operating characteristic curve. The conceptual approach that guides the production of soil erosion by water vulnerability map is presented in Figure 2.

2.3. Preparation and computation of the thematic layers

2.3.1. Drainage density

The DEM was processed for watershed delineation by converting the raw DEM raster into fil (a geodatabase file) data. Flow direction was generated from the fil raster and further processed for the drainage accumulation track. The resulting accumulation raster was refined for drainage tracks not to be less than 100 units per path inflection (DEM ridge-

line). The sink, snap pour point, and stream links were computed for stream order computation. Computation of the stream order was carried out using the Strahler approach (Strahler, 1957). The resulting stream order was converted from raster into polylines and a drainage density map in ArcMap 10.8.1 (Owolabi *et al.*, 2020). The resulting featured class raster is classified into five according to Table 1 (Owolabi *et al.*, 2020).

Table 1. Classification scheme for Tyume drainage density map (Owolabi *et al.*, 2020).

Tabla 1. Esquema de clasificación para el mapa de densidad de drenaje de Tyume (Owolabi *et al.*, 2020).

Class name and rate	Range of Drainage density
Very low	0 – 150
Low	151 – 240
Moderate	241 – 360
High	361 – 600

2.3.2. Topographic Wetness Index

The topographic wetness index (TWI) was generated from the elevation map extracted from ASTER DEM in ArcMap 10.8.1. The study area DEM raster was processed to create the slope map in ArcMap. The output measurement was carried out in degree format at the Z factor of 1 (at default) to reduce the influence of variogram overestimation. Calculation of the TWI was carried out in the raster calculator, using equation 1 (Kirkby and Statham, 1975; Hojati and Mokarram, 2016);

$$TWI = \ln \left[\frac{a}{\tan(\beta)} \right] \quad (1)$$

Where α , specific catchment area = catchment area, A, per unit contour length, L, (A/L), and $\tan(\beta)$ = slope. However, the TWI was converted into an integer format to classify the zones of TWI within the upper and lower quartile to enable the projection of the zones of high and low TWI. The resulting projection of TWI spots was classified into four according to Table 2 (Owolabi *et al.*, 2020).

Table 2. Classification scheme for the projected Topographic Wetness Index (Owolabi *et al.*, 2020).

Tabla 2. Esquema de clasificación para el Índice de Humedad Topográfica proyectado (Owolabi *et al.*, 2020).

Class name	Range of values of TWI
High TWI	6.3 – -12.7
Steep hillslope	-12.8 – -14.4
Gentle zone	-14.5 – -16.6
Low TWI	-16.7 – -20.5

2.3.3. Terrain ruggedness index

Terrain ruggedness index (*TRI*) was carried out by computing the square of the summation of grid cell difference relative to its neighboring cell at the scale of 75 m, where a slight elevation change can be significant. *TRI* is based on the equation of Riley *et al.* (1999) as presented in equation 2:

$$TRI = (\sum(Z_c - Z_i)^2) \quad (2)$$

Where;

Z_c = elevation of a central cell

Z_i = elevation roughness measure n of each cell in the neighborhood at the scale of 75 m $i = 1, 2, \dots, 8$.

2.3.4. Topographic position index

The topographic position index is based on equation 3, formulated by Weiss (2001) and modified by Jennes (2006):

$$TPI = Z_0 - \sum_{n=1} (Z_0/n) \quad (3)$$

Where;

Z_c = elevation of a focal cell

Z_n = elevation of integrated neighborhood cells within the scale of 75m

n = The total number of the neighboring cells around the focal cell.

2.3.5. Vector roughness measure

The vector roughness measure estimation is based on calculating slope variability as a 3-dimensional attribute of vertical and horizontal aspect components. Hence, the slope and the Aspect of the study area are computed first. It is based on standard trigonometric operation according to the steps as presented in equation 4 (Sappington *et al.*, 2007):

$$VRM = 1 - \left(\sqrt{X_{sum}^2 + Y_{sum}^2 + Z_{sum}^2} \right) / 75^2 \quad (4)$$

Where;

$$X_{sum} = Focal(\sin \Lambda, \oint = sum)$$

$$Y_{sum} = Focal(\cos \Lambda, \oint = sum)$$

$$Z_{sum} = Focal(\cos \int, \oint = sum)$$

Λ = Aspect, \int = slope, and \oint = interface function, while 75 m represents the scale of computation.

2.3.6. Land use / cover and accuracy assessment

The bands 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7 of Landsat 8 OLI were exported into ArcMap 10.8.1 and stacked to obtain a composite band. The change in the computation of land use /land cover (LU/C) adopted the supervised mapping approach. For developing a training manager sample for the computation exercise, the false-color composite bands for vegetation, water bodies, and built-up areas were computed using the information presented in Table 3.

At least 20 return-on-investment training samples were randomly selected per three cells for every tonal variation in areas with a concentration of spectral reflectance. However, points chosen for the training manag-

er samples matched historical images of the study area acquired from the Google Earth map. The LU/C computation was based on the five significant features with high sensitivity to soil erosion processes (Table 4).

Table 3. Band selection and arrangement for land use/land cover characterization (Butler, 2013).

Tabla 3. Selección y disposición de bandas para la caracterización del uso/cobertura del suelo (Butler, 2013).

Composite feature	Band combination used
Natural color	4 3 2
Built-up areas	7 6 4
Woodland	5 6 2
Scrubs and velds	6 5 2
Water bodies/bare	5 6 4

A signature file was generated following the characterization of false-color composite band reflectance. The supervised raster characterization was mapped using a maximum likelihood approach at an equal priority probability weighting. The image classification accuracy for respective years of the LULC was performed with 72 samples using the confusion matrix. The confusion matrix was computed by sampling 72 training cells randomly as the user's value on the LULC. The sample is compared with a Google Earth Pro image

Table 4. Thematic categories for land use/land cover mapping.

Tabla 4. Categorías temáticas para la cartografía de uso/cobertura del suelo.

LU/C Features	Description
Built-up areas	Areas predominated with artificial imperviousness cover, such as tarred or plastered roads, plastered parks, residential, institutional, and commercial buildings.
Waterbody	Areas with evidence of natural ponds or flow. This includes lakes, dams, open streams, rivers, natural pools, etc.
Woodland	Areas predominated with an advanced stage of tree growth with a possible high vegetation density greater than 50%. This includes areas dominated by thickets, canopy trees, and deciduous trees.
Scrubs and Veld	Areas with sparse shrubs, veld, possible cropping or grazing activities with vegetation density within 20% - 50% and vegetation height, not more than 1.80 m.
Bare-ground	Areas exhibiting signs of severe degradation, clear-cuts, with scanty grass cover and shrubs, untarred (dirt) roads, and with low vegetation density, less than 20%.

of the same time slide and recorded as the producer's value.

The overall accuracy and the Kappa coefficient are calculated as shown in equations 5 and 6:

$$\text{Overall Accuracy} = \frac{\text{The sum of Correctly classified pixels}}{\text{Total number of reference pixels}} \times 100 \quad (5)$$

$$K = \frac{N(\sum_{i=1}^r x_{ii}) - (\sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i}))}{N^2 - (\sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i}))} \quad (6)$$

where r is the number of rows in the error matrix, x_{ii} is the classified pixels in row i and column i , x_{i+} and x_{+i} are the pixels in row i and column i , and N is the total number of the sampling points used.

The overall classification accuracy and the Kappa coefficient value for the resultant error matrix of the computed LU/C showed a near-perfection deduction, with the overall accuracy and Kappa coefficient being 86.11% and 82.49% (Table 5). The user's value is computed along the rows, while the producer's value is calculated along the column.

The reflectance distribution was classified as values, while the characteristic cells were enumerated as counts in the attribute table, which was extracted for each raster for further statistical estimation.

Table 5. LULC classification accuracy assessment based on error and confusion matrix.

Tabla 5. Evaluación de la precisión de la clasificación LULC basada en la matriz de error y confusión.

Land Use/ Cover	Built-up area	Bare ground	Forest	Veld	Water body	Total	Comm error	User's accuracy
<i>Built-up area</i>	11	1	0	3	0	15	26.67	73.33
<i>Bare ground</i>	0	15	0	3	0	18	16.67	83.33
<i>Forest</i>	0	0	10	1	0	11	09.09	90.91
<i>Veld</i>	0	1	1	14	0	16	12.50	87.50
<i>Water body</i>	0	0	0	0	12	12	00.00	100
Total	11	17	11	21	12	72		
Omission error	0	11.76	09.09	33.33	0			
Producer's accuracy	100	88.24	90.91	66.67	100			
Overall accuracy (%)	86.11							
Kappa coefficient (%)	82.49							

2.3.7. Geological Spatial distribution

The Eastern Cape geology map (scale 1:250,000) was acquired from the Council for Geoscience Studies (CGS) and modified by extracting the study area. The clipped data was converted into a raster file and reclassified based on the mudstone-sandstone ratio, while dolerite was the most resistant rock among the geologic class. Różycka *et al.* (2017) noted that mudstone-dominated materials are highly susceptible to landslide and mass waste. Hence, this served as a basis for litho-material reclassification for vulnerability mapping. Details of mudstone content in the Eastern Cape Karoo Supergroup are documented in Owolabi *et al.* (2021b).

2.4. Overlay analysis

The maps prepared earlier were reclassified and assigned a weight based on their susceptibility potential. Assignment of weightage was majorly based on review and expert judgment. Hence, VRM was assigned the least weightage (12) while LU/C is rated highest (16) due to its vulnerability tendency at the zones of morphogenetic alteration. DD, TWI, TRI, TPI, and Geology were assigned similar

weights (15) (Table 6). The weighted sum method of overlay analysis was employed to compute the vulnerability analysis using the weightage of layers (Table 6) and the proposed Soil Erosion Potential Areas, SEPA, in equation 7;

$$SEPA = \sum_{i=1}^7 (W_i \times fs_{ij}) \quad (7)$$

where W_i represents the weight for factor i and fs_{ij} Represents the field score of class j of factor i . The weighted sum approach was built in ArcMap 10.8.1. The SEPA index is classified into five major zones: critically high, high, medium, low, and non-vulnerable soil erosion areas.

2.5. Validation of soil erosion vulnerability map

The assessment was validated using a Google Earth map survey. Unlike field mapping, which may be limited by inaccessibility and coverage, the Google Earth map offers a 3-dimensional view without a restriction to length. Eighty-three spots within the None/very low, low, moderate to high soil erosion zones were georeferenced randomly from the soil ero-

Table 6. Weightage of thematic layer for overlay analysis of vulnerability map production.
 Tabla 6. Ponderación de la capa temática para el análisis de superposición de la producción de mapas de vulnerabilidad.

Thematic layer (Weight)	Classes	Field score	Field Weight
Drainage density (15)	Very low	1	1.88
	Ineffective	2	3.75
	Effective	7	13.13
	Ponding	8	15.00
Topographic wetness index (15)	None	1	2.5
	Low	2	5.0
	Moderate	5	12.5
	High	6	15.0
Terrain ruggedness index (15)	Flat	1	3
	Low	2	6
	Moderate	4	12
	High	5	15
Topographic position index (12)	Very low	1	03.75
	Low	4	15.00
	High	5	18.75
	Very high	6	22.50
Vector roughness measure (12)	Very low	1	2.4
	Low	2	4.8
	High	4	9.6
	Very high	5	12
Geology (15)	Jurassic Dolerite	1	2.5
	Quaternary sand	2	5
	Middleton Formation	3	7.5
	Katberg Formation	4	10
	Balfour Formation	6	15
Land use/ land cover (16)	Woodland	1	2
	Scrub and Veld	2	4
	Built-up	5	10
	Water bodies	6	12
	Bare	8	16

sion vulnerability map for visual inspection and analysis under the Google Earth map. The Google Earth time was set to the default (with variation between December 2019 and April 2020) as deployed by CNES/Airbus. The sampling points were carefully randomized across

the entire catchment area and tributaries to prevent the monotony of attributes in the river valley (Vrieling *et al.*, 2006). Hence, sampling points are not in the center of the catchment. Information filtered from the use of Google Earth includes the following:

1. Discrimination of erosion channel from a drainage channel.
2. Identification of erosion type.
3. Linear measurement of the erosional path.
4. Extraction of camera height for the resolution of magnification.
5. Classification of slope and bareness of the affected area.
6. Estimation of soil erosion proneness.

The visual interpretation and estimation of Soil erosion proneness using the Google Earth map survey was informed by Dwivedi and Ramana (2003) and Vrieling *et al.* (2006), indicated in equation 8:

$$Ep = \frac{f_b \times f_s \times M_{rs} (\sum N_g + \sum N_r + \sum N_s)}{100} \quad (8)$$

where Ep is the erosion proneness, f_b is the bareness factor, f_s is the slope factor, M_{rs} is the camera reference scale in km, N_g is the normalized length of a gully in km, N_r is the normalized length of a rill in km, and N_s is the length of the sheet in km. The length of the rill and gully are normalized by the multiples of 2 and 3, respectively, due to the variation in depth of impact. The designation of rating factors based on bareness and the extent of the slope was based on Table 7.

The calculated soil erosion proneness was tabulated with its georeference and the corresponding grid codes for soil vulnerability drawn from georeference identity. The extracted grid codes are plotted against the Ep for its coefficient of determination. Based on the coefficient of determination (R^2), $R^2 < 0.5$ indicates that the model is unreliable and does not replicate the field observation. $R^2 = 0.5$ suggests that the model is reliable as 50% of the field observation correlates with the simulation provided, while $R^2 \geq 0.75$ indicates

that the model is excellent in replicating the field observation.

Table 7. The rating factor is used for calculating erosion proneness.

Tabla 7. El factor de calificación se utiliza para calcular la propensión a la erosión.

Attributes	Rating factors
Bareness	1
Densely riparian	2
Lightly vegetated	3
Veld	4
Bared	5
Peneplain	1
Pediplain	2
Fair hillslope	3
Abrupt hillslope	4

The performance of SEPA was further assessed graphically using the Receiver operating characteristics curves (ROC). ROC is a binary probabilistic algorithm that evaluate model performance by quantifying the coherence of predicted data with the ranked probabilities of the observed data using the plot of model sensitivity against the probable extent of model specificity from 100% (Verbakel *et al.*, 2020; Halder *et al.*, 2021). The model sensitivity estimates the proportion of the positive predictive value (PPV) among the actual noncase, the specificity estimates the proportion of the negative predictive value (NPV) while the area under curve (AUC) provides the goodness of the fit. ROC curve has provided crucial metrics in similar soil erosion susceptibility mapping involving morphometric parameters among others (Hembram *et al.*, 2019; Halder *et al.*, 2021; Biswa and Giri, 2023; Dutta *et al.*, 2024).

The model sensitivity and specificity are obtained using equations 9 and 10:

$$PPV = \frac{TP}{TP+FN} \quad (9)$$

$$NPV = \frac{FP}{FP+TN} \quad (10)$$

Where TP denotes the true positive, FN denotes the false negative, FP denotes the false positive, and TN denotes the true negative. The model sensitivity and specificity in this study are obtained by classifying the grid-codes into two; from the moderate with low grid-code ($\text{Grid-code} \leq 350$) and moderate to very high soil erosion ($\text{Grid} > 350$) and extracting the frequencies of higher (lower) $EpEp$, relative to the grid codes about varying scenarios of class threshold and vice-versa. The higher (lower) $EpEp$ are cross-tabulated as the significantly (insignificantly) eroded frequencies, against the “Grid > 350” ($\text{Grid-code} \leq 350$) with the rationale that higher (lower) $EpEp$ and “Grid > 350” ($\text{Grid-code} \leq 350$) cross-tabulation provides the true positive, TP (true negative, TN). The positive likelihood ratio was derived by obtaining the slope of sensitivity/(1-sphericity), while the Area Under Curve (AUC) was obtained by integrating the sensitivity variables over sphericity variables. The optimum threshold was obtained from the outcome resulting in the largest sensitivity and sphericity from the grid codes.

In addition, a fishnet (20 by 20) is created in ArcMap to discretize the entire study area for critical validation. The discreet units produced 400 units, with 1.92 km by 1.13 km, which was further trimmed into 219 units by removing units whose centroids were outside the study portion. The predicted SEPA for each discreet unit was extracted zonal for the dominating (majority) SEPA class. Also, the 2020 regional land use/ land cover map of South Africa of 73 classes was further reclassified into 8 (Forested area, Shrub cover, grass cover, water bodies, bare area, farming area, settlements, and developed area) and extracted for the dominating class. The

validation of each discreet unit is based on Le Roux’s (2012) approach through visual interpretation and vectorization aided by Système Pour l’Observation de la Terre (SPOT) 5 imagery at a scale of 1:10,000. In this study, Google Earth and 216.96 ha reference scale were used, while the visual interpretation was based on the following assumptions per the dominating SEPA class;

- Class 1 observation represents the non-vulnerable area based on a significant proportion (70%) of the area being relatively covered by vegetation, with stable soil conditions, or with natural landscape attributes (Owolabi *et al.*, 2023).
- Class 2 observation represents the area with a significant proportion (35%) of the terrain exhibiting the potential for soil erosion based on exposure of the subsoils in critical/ vulnerable drainage channels, the non-conservative land use/ land cover features, and track evidence of sheet erosion.
- Class 3 observation represents the area with a significant proportion (35%) of the terrain exhibiting clear evidence of rills, inter-rills, subsoils, and channel erosion.
- Class 4 observation represents the area with a significant proportion of gully developments, extensive rills, inter-rills, and unnatural channel dissections with solid evidence of subsoil crevices.

The four classifications were used with the rationale that class-1, -2, and -3 observations would be replicated by SEPA prediction with non-vulnerable, low, and medium soil erosion potential. At the same time, class-4 is expected to replicate SEPA prediction with high and critically high soil erosion potential. Overall, the observed and predicted classes are tested using confusion matrices. The deductions are corroborated by the Regional Land use/ land

cover features of 2020 provided by the Department of Environmental Affairs of South Africa.

3. Results

3.1. Morphometric Parameters analysis

The drainage density (DD) computation shows that the Tyume River Basin (TRB) is characterized by an elongated but dendritic fluvial network with a southward river flow influenced by terrain physiography (Figure 3A). The high DD are areas of surface water accumulation. Moderate DD areas are active hydraulic actions and soil transportation, while low sections are areas of infrequent drainage activities. The shallow sections are ridges bor-

dering the watershed. Topographic wetness index maps have been noted to provide information on the areas of soil moisture accumulation, soil depth, soil thickness, and zones of possible offsite soil erosion by water (Figure 3B). The classification of the TWI revealed that the high TWI (4%) has the least coverage, followed by the moderate TWI (8%), the low (36%), and the none TWI section (52%) having the largest coverage. Terrain ruggedness index (TRI) reveals landforms corresponding to terrain features such as hilly terrains, ridges, heaps, cols, passes, and valleys (Figure 3C). The high TRI zones correlate visually with the geologic basement, exhibiting high erosion resistance zones. At the same time, the low TRI aligns with the plain and tends to exhibit soil erosion vulnerability. The Topographic position index (TPI) plot impresses with the

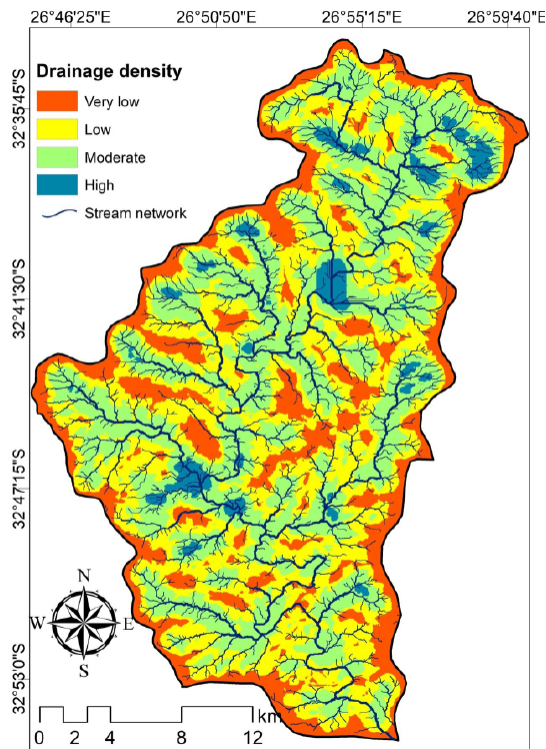


Figure 3A. Drainage density together with the stream network of Tyume basin.

Figura 3A. Densidad de drenaje junto con la red de arroyos de la cuenca de Tyume.

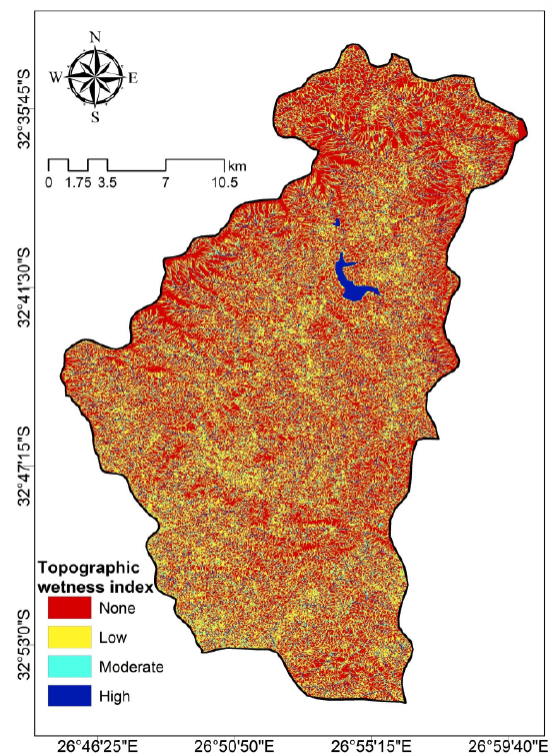


Figure 3B. Topographic wetness index of Tyume Basin.

Figura 3B. Índice de humedad topográfica de la cuenca de Tyume.

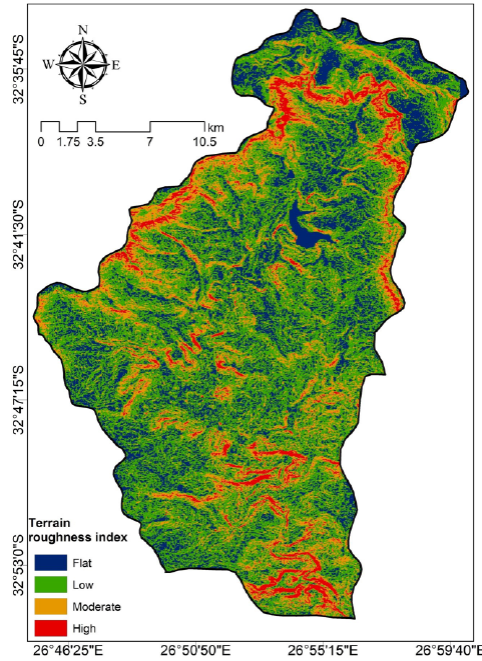


Figure 3C. Terrain roughness index of Tyume Basin.
Figura 3C. Índice de rugosidad del terreno de la cuenca de Tyume.

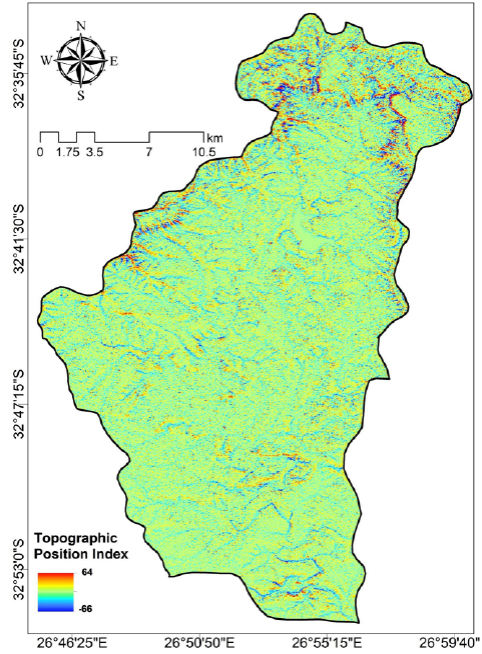


Figure 3D. Topographic position index of Tyume Basin.
Figura 3D. Índice de posición topográfica de la cuenca de Tyume.

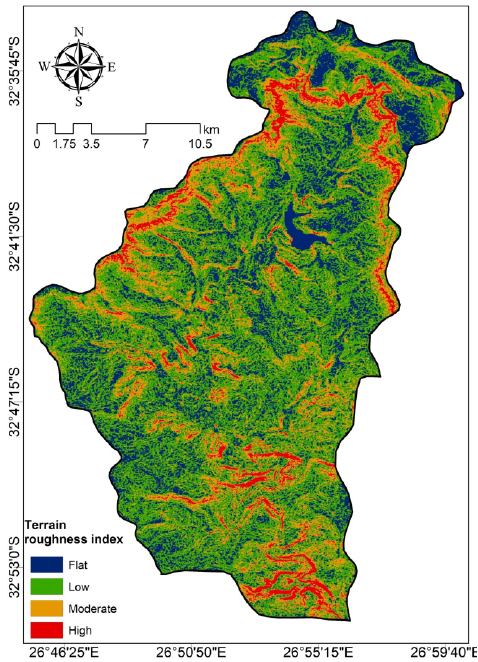


Figure 3E. Vector roughness measure of Tyume Basin.
Figura 3E. Medida de rugosidad vectorial de la cuenca de Tyume.

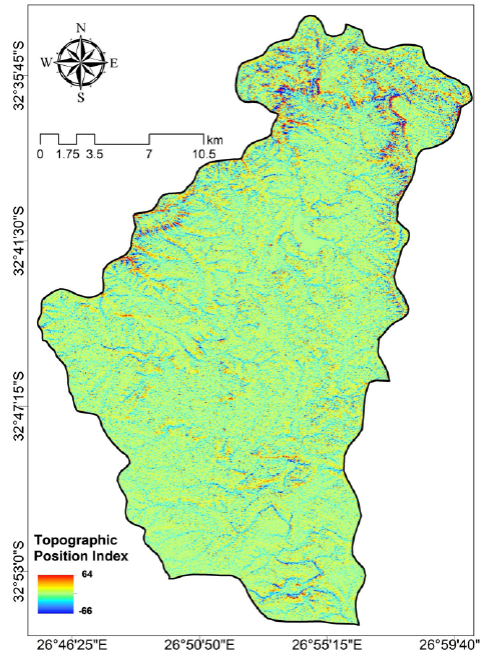


Figure 3F. Lithology of Tyume basin (Robb et al., 2006).
Figura 3F. Litología de la cuenca Tyume (Robb et al., 2006).

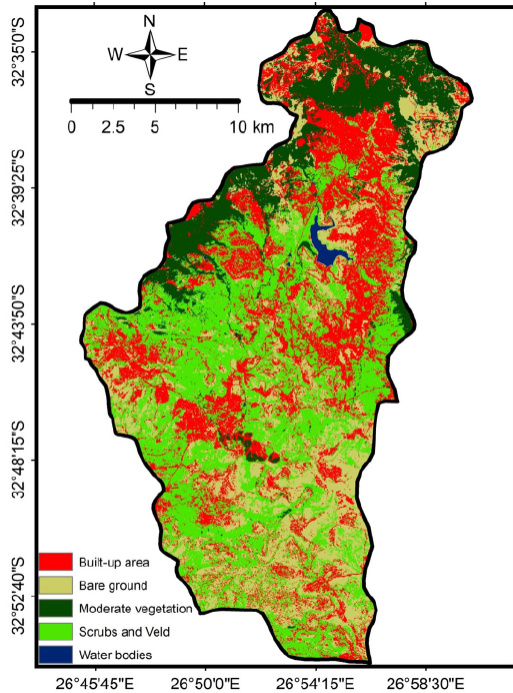


Figure 3G. Land use-cover map of Tyume basin for the year 2019.

Figura 3G. Cobertura de uso del suelo de la cuenca de Tyume para el año 2019.

terrain physiography, thus depicting the depressions along the Tyume River track (Figure 3D). The high TPI are areas of significant concavity, signaling the potential for gully or valley development, while the low TPI are areas of convexity and the possible lines of a continuous slope. The Vector roughness measure (VRM) plot provides information on the area of abrupt curvature based on the integration of slope and aspect variability (Figure 3E). The high VRM captures the areas of high hydraulic pressure and erosivity potential, while the low VRM captures the areas of low curvature and low erosivity potential.

3.2. Gology

The geological information of the Tyume basin comprises the basement (hard rock), the sedimentary rock (soft rock), and the qua-

ternary sediments covering about 553 km² (81%), 90 km² (13%), and 12.85 km² (2%) (Figure 3F). The Quaternary sediments are products of fluvial outwash from bedform assemblages through the complex interplay of climate and geo-allogenic processes such as tectonic subsidence, rifting, and hinterland erosion (Wilson *et al.*, 2014; Owolabi *et al.*, 2021b). The high mudstone content of the Balfour Formation typifies its high tendency for soil erodibility; hence, it scored higher weightage than the Katberg Formation, Middleton Formation, Quaternary sediments, and the Dolerite, which is highly resistant to hydraulic fracturing.

3.3. Land use/cover

The LU/C map shows that the vegetation covers 48% of the entire TRB, with the forest and scrub-and-veld occupying 89.88 km² and 215.25 km² (Figure 3G). The water bodies were visible within 3.65 km². The built-up area and the bare ground covered 178.66 km² and 154.92 km², respectively (Figure 3G). Vegetation is the most significant LU/C feature to soil erosion mitigation due to its root system and canopy cover actions against erosion due to overland flow, interflow, and rain-splash, as well as the organic deposits improving soil structure against erodibility (Parwada and Van Tol, 2016). Due to the essential role of vegetation, the woodland and scrub-to-veld cover are ranked as the least. The bare is ranked highest due to its high vulnerability to soil erosion. In contrast, the water area is ranked lower than the bare ground because soil detachment and abrasion are highest on the bank. At the same time, transportation and degradation only occur within the water body.

3.4. Vulnerability map of water soil erosion

Soil erosion potential area index obtained ranges in vulnerability from critically high, ap-

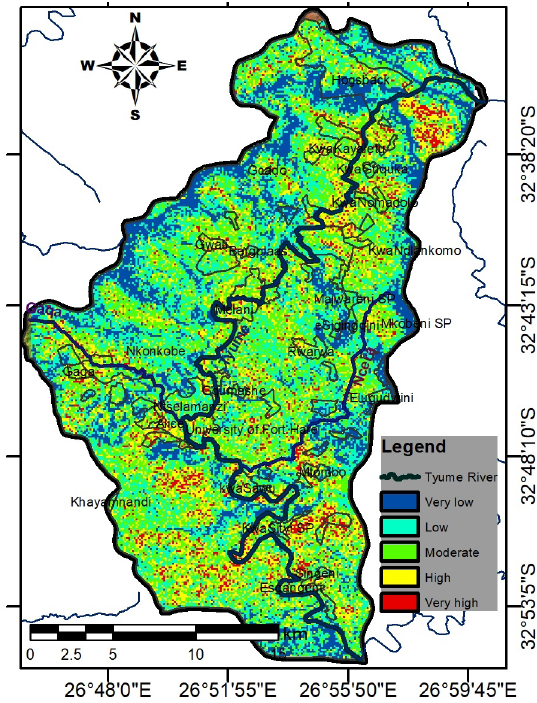


Figure 4. Tyume River basin vulnerability by soil erosion by water showing the vulnerable spots within the basin.

Figura 4. Vulnerabilidad de la cuenca del río Tyume por la erosión hídrica.



Figure 5A. View of areas of mild soil erosion by water (shown with blue arrows).

Figura 5A. Vista de áreas de leve erosión del suelo por la agua (mostradas con flechas azules).

proximately 40 km² (6%), high, 135 km² (20%), medium, 209 km² (31%), and low, 186 km² (27%), to a non-vulnerable degree, 113 km² (17%) (Figure 4). The zone of high soil erosion vulnerability is concentrated in the northeast and west, where land development is high, and in the southwest and south, where plain and riparian activities favor intense cultivation and pastures. Fundamentally, drainage paths often follow alterable morphogenetic paths with high permeability or susceptibility to hydraulic action. Exposure and lowering of soil aggregate with the drainage path raise channel vulnerability and the development of rills.

3.5. Corroboration of the soil erosion vulnerability map

The sixty-three assessment points were randomly picked from moderate to highly vulnerable zones for Google Earth scenery sampling and analysis. Of the sixty-three points, seven points have no soil erosion indication or erosional drainage, while twenty-one show mild soil erosional tracks, as shown in Figures 5 A – B. About 55% of the sampled field points show distinct erosional features of gully, rill, and sheet erosions and areas where mass wastes resulted from aggregation of the soil erosions (Figure 5B). Related grid codes of sampled points were extracted in the ArcMap to provide a platform for assessing model accuracy, validation, and corroboration (Table 8). The coefficient of determination (R²) shows a reliable confidence level in the model as the actual field condition is average (Figure 6). This suggests that about 55% percent of the degree of evaluation is satisfied by the assessment and indicates that SEPA approach can be adopted for soil erosion modeling if the statistical classifier and other significant factors can be included. The model was further diagnosed using the Receiver Operating Characteristics curve (ROC) due to its robustness and the in-depth information it provides (Figure 7). The plot indicated that the model

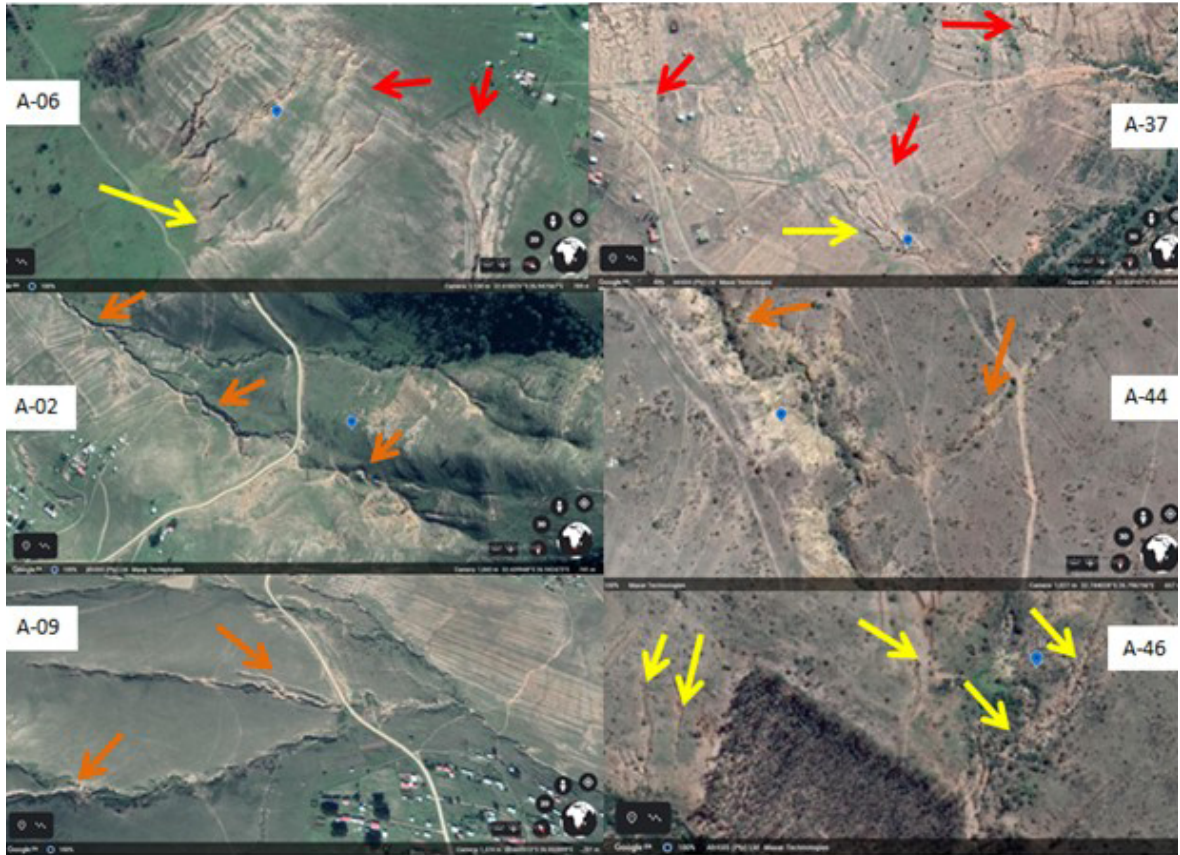


Figure 5B. View of tracks of soil erosion by water (Areas of mass waste resulting from rill erosion are shown with red arrows, rill erosion tracks are shown with yellow/orange arrows)

Figura 5B. Vista de las huellas de la erosión hídrica del suelo (las áreas de depósitos resultantes de la erosión en surcos se muestran con flechas rojas, las huellas de la erosión en surcos se muestran con flechas amarillas/naranjas).

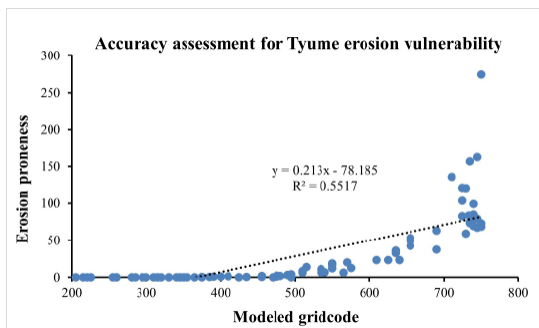


Figure 6. Plot of accuracy assessment of Tyume soil erosion by water modeling.

Figura 6. Gráfico de evaluación de la precisión de la erosión del suelo de Tyume mediante modelado hídrico.

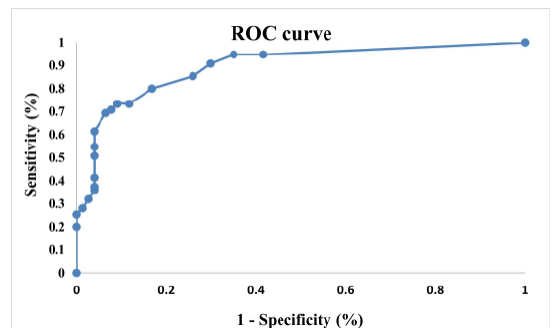


Figure 7. Receiver Operating Characteristics curve of soil erodibility validation.

Figura 7. Curva de características operativas del receptor de validación de la erosionabilidad del suelo.

Table 8. Data of estimated erosion proneness with Tyume River basin

Tabla 8. Ubicación del centroide de la cuenca, tipo de cuenca cuaternaria y área en kilómetros cuadrados.

Longitude (Degree)	Latitude (Degree)	Counts	ID-code	Bareness	Slope	Erodibility km ²	Camera km ²
26.977	-32.623	730	A-01	4	4	120.676	753
26.977	-32.634	725	A-02	3	4	261.048	759
26.981	-32.613	690	A-03	3	4	37.5937	1035
26.951	-32.626	745	A-04	4	2	78.823	1179
26.936	-32.638	750	A-05	3	2	68.236	1027
26.944	-32.617	745	A-06	4	3	162.453	784
26.951	-32.656	655	A-08	2	3	48.745	1189
26.951	-32.67	750	A-09	3	3	274.65	789
26.931	-32.68	540	A-10	3	1	6.841	1060
26.903	-32.657	495	A-12	1	1	0.231	2160
26.956	-32.736	735	A-13	2	2	74.792	1304
26.94	-32.729	565	A-14	2	1	6.562	1217
26.935	-32.75	425	A-15	1	1	0.113	1843
26.913	-32.767	535	A-16	2	2	11.286	922
26.904	-32.797	740	A-17	3	2	69.474	1130
26.902	-32.8	735	A-18	3	3	73.392	1668
26.911	-32.808	745	A-19	3	2	67.138	1047
26.869	-32.811	730	A-20	4	2	59.261	811
26.87	-32.838	435	A-21	3	1	0.626	1520
26.917	-32.838	635	A-22	2	1	35.927	943
26.901	-32.843	550	A-23	2	2	16.588	2326
26.912	-32.863	740	A-24	3	3	98.763	668
26.931	-32.887	635	A-25	3	2	32.558	864
26.892	-32.877	550	A-26	3	3	12.256	1202
26.853	-32.877	455	A-27	2	1	0.102	2139
26.828	-32.846	490	A-28	1	1	0.145	1048
26.829	-32.864	495	A-29	1	1	0.156	1150
26.816	-32.85	470	A-30	1	1	0.245	1342
26.844	-32.835	475	A-31	3	3	0.287	1334
26.87	-32.825	490	A-32	4	3	0.234	1374
26.901	-32.844	640	A-33	2	2	23.316	867
26.837	-32.818	535	A-34	3	2	10.556	1460
26.831	-32.819	575	A-35	3	2	2.723	1162
26.817	-32.798	455	A-36	2	1	0.532	940
26.823	-32.824	710	A-37	4	3	135.939	865
26.815	-32.791	410	A-38	2	1	0.362	1609
26.826	-32.775	570	A-39	3	1	2.31	1334
26.785	-32.762	750	A-42	4	2	72.661	1204
26.802	-32.746	625	A-43	4	2	23.153	3379

is reliable and will perform well due to the ROC curve's concavity, that is, the proximity of threshold 1 (optimum tangential path of the parabola), which drifts away from the diagonal to the standard angle. The area under the ROC is 0.867, which implies that the degree of separability of the model between the positive and the negative outcome to the actual soil erodibility potential is excellent, reliable, and highly predictive. The optimum sensitivity and sphericity lie on 510 grid-code; hence, a grid-code value more significant than this indicates the possible existence of soil erosion features. The validation shows no discrimination between the gully and rill erosion features captured by the high zones of the vulnerability assessment. This is probably due to the resolution of the digital elevation model used, which was 30 m by 30 m.

Meanwhile, most of the gully features were continuous from the rill features, whereas the latter is the dominant feature in the basin. The erosion features are peculiar to the areas of bareness, which are often near settlements or townships. As guided by Google Earth corroboration, most of the eroded areas within the bare zones were characterized by rill erosion. Areas of high relief and slope also contribute significantly to the soil erosion features where most features taper from sheet to gully erosional features. Most of the erosional features were connected to the natural drainage. The validation exercise shows that many vulnerable spots are associated with either gullies or a collection of long inter-rills. In the north, most of them lie in the bare or grassland area, while in the center and south of the basin, the vulnerable area occupies the cultivated and bare grounds surrounding the riparian lands (Figure 5A; A-10, A-14). The broadest vulnerable south area is characterized by an overgrazed expanse of rangeland whose drainage channel is badly mutilated, possibly by overstocking or uncontrolled cattle patronage.

Similarly, the corroboration based on holistic assessment with GIS fishnet and Google Earth validation is presented in Table 9. The holistic investigation based on the GIS fishnet captured 219 zones per 216.96 ha. The dominating (majority) SEPA attributes which constitute the predicted values comprise 31, 66, 97, and 25 counts for Class-1, -2, -3, and -4, relative to the 53, 93, 61, and 12 counts for the accurate observation based on Google Earth validation, respectively. Also, the matrices of the observed classes and the major SEPA predictions generated the result presented in Table 10. The investigation showed that 38% of areas identified as being dominantly non-vulnerable were contrarily associated with low soil erosion potential, while SEPA predictions are 64%, 49%, and 44% accurate for Class-2, -3, and -4, thus depicting an overestimation of soil erosion potential. The regional LUC showed that the erroneous estimates lie in areas dominated by grassland, partly affected by bareness within the hillslope, followed by the forested areas in the hillslope partly associated with bareness and subsoil exposure. The corroboration showed that the topographic model for soil erosion is excellently sensitive to areas with glaring soil erosion development. At the same time, it provides a considerable approximation for the highly eroded and non-vulnerable area, drawing from the sensitivity and specificity results. The overall accuracy and Kappa coefficient of SEPA prediction are 55% and 36%, respectively, suggesting moderate reliability of the model, although with a low representation of the actual ground situation.

4. Discussion

The modeling of TRB enabled the characterization of the terrain susceptibility to soil erosion into five vulnerable zones: critically high, high, medium, low, and none. The model is computed by integrating the thematic layers of morphometric parameters, LU/C, and

Table 9. Few of the data drawn from the holistic visual evaluation based on Le Roux (2012).
 Tabla 9. Algunos de los datos extraídos de la evaluación visual holística basada en Le Roux (2012).

SN	Longitude	Latitude	Predicted	Observed	SN	Longitude	Latitude	Predicted	Observed
1	26.88444	-32.9053	1	1	43	26.92059	-32.8357	4	4
2	26.89649	-32.9053	1	1	44	26.93264	-32.8357	4	4
3	26.90854	-32.9053	2	1	45	26.81214	-32.8183	2	1
4	26.92059	-32.9053	1	2	46	26.82419	-32.8183	3	1
5	26.93264	-32.9053	3	3	47	26.83624	-32.8183	4	3
6	26.86034	-32.8879	2	1	48	26.84829	-32.8183	4	3
7	26.87239	-32.8879	3	2	49	26.86034	-32.8183	3	1
8	26.88444	-32.8879	3	2	50	26.87239	-32.8183	4	4
9	26.89649	-32.8879	2	1	51	26.88444	-32.8183	3	3
10	26.90854	-32.8879	2	2	52	26.89649	-32.8183	2	2
11	26.92059	-32.8879	2	2	53	26.90854	-32.8183	3	3
12	26.93264	-32.8879	4	4	54	26.92059	-32.8183	3	3
13	26.82419	-32.8705	3	2	55	26.80009	-32.8009	3	2
14	26.83624	-32.8705	4	3	56	26.81214	-32.8009	3	2
15	26.84829	-32.8705	4	3	57	26.82419	-32.8009	3	1
16	26.86034	-32.8705	4	3	58	26.83624	-32.8009	1	1
17	26.87239	-32.8705	4	3	59	26.84829	-32.8009	2	2
18	26.88444	-32.8705	3	2	60	26.86034	-32.8009	3	2
19	26.89649	-32.8705	3	3	61	26.87239	-32.8009	3	1
20	26.90854	-32.8705	3	3	62	26.88444	-32.8009	3	1
21	26.92059	-32.8705	3	3	63	26.89649	-32.8009	3	3
22	26.93264	-32.8705	2	2	64	26.90854	-32.8009	4	4
23	26.81214	-32.8531	3	1	65	26.92059	-32.8009	1	2
24	26.82419	-32.8531	3	1	66	26.93264	-32.8009	1	2
25	26.83624	-32.8531	3	1	67	26.77599	-32.7835	4	3
26	26.84829	-32.8531	4	2	68	26.78804	-32.7835	2	2
27	26.86034	-32.8531	3	2	69	26.80009	-32.7835	1	2
28	26.87239	-32.8531	4	3	70	26.81214	-32.7835	3	2
29	26.88444	-32.8531	3	2	71	26.82419	-32.7835	4	4
30	26.89649	-32.8531	2	2	72	26.83624	-32.7835	4	3
31	26.90854	-32.8531	4	2	73	26.84829	-32.7835	2	2
32	26.92059	-32.8531	3	3	74	26.86034	-32.7835	3	2
33	26.93264	-32.8531	4	2	75	26.87239	-32.7835	2	2
34	26.81214	-32.8357	3	1	76	26.88444	-32.7835	3	3
35	26.82419	-32.8357	3	1	77	26.89649	-32.7835	3	2
36	26.83624	-32.8357	3	1	78	26.90854	-32.7835	2	1
37	26.84829	-32.8357	3	2	79	26.92059	-32.7835	2	2
38	26.86034	-32.8357	2	1	80	26.93264	-32.7835	2	2
39	26.87239	-32.8357	2	2	81	26.77599	-32.7661	3	2
40	26.88444	-32.8357	3	2	82	26.78804	-32.7661	3	2
41	26.89649	-32.8357	2	2	83	26.80009	-32.7661	3	3
42	26.90854	-32.8357	4	3	84	26.81214	-32.7661	1	2

geology. The deduction of the ROC curves, 89.9%, validates the vital essence of the geomorphic-based model for the soil erosion susceptibility model. At the same time, the confusion matrices clarify the model's performance in terms of its sensitivity, specificity, accuracy, extent of representation, excesses, and limitations. At the same time, it corroborates ROC curve finding. Based on the holistic corroboration with confusion matrices (Tables 9-10), the exceptionally high and high, accentuated by class-4 (44%), corresponded with the Hillslope farming area possibly abandoned or used for farm-

ing. Some are associated with bareness and deciphered to have served as a farming area before being abandoned. There are cases where urbanization induces channel erosion. The regional land use/cover map confirmed that grasses covered most of this area, whereas Google Earth showed traces of following and abandonment.

The erroneously captured area was dominated by scanty shrub covered with exposed subsoil. The moderately eroded portion, accentuated by Class-3 dominance, is mainly associated with bareness and channel ero-

Table 10. Confusion matrices for the holistic evaluation of model performance.
 Tabla 10. Matrices de confusión para la evaluación general de la aplicación del modelo.

		Observed Google Earth classification value			
		<i>Class-1</i>	<i>Class-2</i>	<i>Class-3</i>	<i>Class-4</i>
SEPA Predicted Value	<i>Class-1</i>	19	12	0	0
	<i>Class-2</i>	22	42	2	0
	<i>Class-3</i>	12	36	48	1
	<i>Class-4</i>	0	3	11	11
		<i>Class: 1</i>	<i>Class: 2</i>	<i>Class: 3</i>	<i>Class: 4</i>
Sensitivity	0.358	0.452	0.787	0.917	
Specificity	0.928	0.810	0.690	0.932	
Pos Pred Value	0.613	0.636	0.495	0.440	
Neg Pred Value	0.819	0.667	0.893	0.995	
Prevalence	0.242	0.425	0.279	0.055	
Detection Rate	0.087	0.192	0.219	0.050	
Detection Prevalence	0.142	0.301	0.443	0.114	
Balanced Accuracy	0.643	0.631	0.738	0.925	
Overall Statistics					
Accuracy: 0.5479					
95% CI: (0.4795, 0.6151)					
No Information Rate: 0.4247					
P-Value [Acc > NIR]: 0.0001602					
Kappa: 0.3616					
McNemar's Test P-Value: < 0.00000					

sion. The soil type also played a significant role in the erodibility of the soil, as shown by the numerous subsoil exposures in the area. With TRB being dominated by Calcic Vertisol and Calcaric Regosol (Dijkshoorn *et al.*, 2008), an uncoordinated use of such land, such as excessive grazing, hillslope farming, and uncoordinated afforestation after fallowing may render Vertisol and Regosol soil types vulnerable to soil erosion. Basga *et al.* (2020) noted that vertisols and regosols are highly susceptible to soil erosion by water due to their expansivity and slow filtration. Both soils dominate areas where farming activities and land abandonment possibly render the terrain vulnerable to soil erosion. Numerous authors, including van Leeuwen *et al.* (2019), Yue *et al.* (2020), and Shtober-Zisu *et al.* (2024), highlighted several cases of soil degradation process initiated by farmland abandonment as posited in this study. However, the significant factor captured as the driver of soil erosion is the sparsely vegetated, fallow, or bare surface with weak topsoil, where settlement, farming activities, or farm abandonment are evident, especially by the hillslope and frequently drained area (Figure 4).

The spatial trend exhibited by the soil erosion vulnerability map indicated the concentration of extreme soil erosion vulnerability in the northwest, west, southwest, and south. The northeast represents the high relief area with abrupt concavity and slope, which may enhance runoff-erosivity by the hillslope and create an erosive plunge at the foothill. High relief area in Tyume Catchment to the east has been classified as the hinterland of the Great Escarpment, where upsurging tectonically emplacement sub-mountain range could trigger orographic rainfall with high intensity and erosivity (Zengeni *et al.*, 2016). As a result, the terrain analysis provides vital information about the soil erosion vulnerable areas induced by the topographic features. Being aided by LUC and the geology map, the MPs

suitably fulfill the geomorphic and hydrologic requirements of soil erosion models by simulating the areas of possible runoff erosivity based on the terrain roughness, concavity, and topographic position closeness based on the TRI, VRM, and TPI deduction. The DD and TWI also indicate the area of frequent runoff, accumulation, and channel erosivity. Shtober-Zisu *et al.* (2024) remarked on the excellent performance of TRI in identifying areas with soil erosion incision due to high rainfall erosivity.

Meanwhile, Owolabi *et al.* (2020) provided the vast application of DD and TWI for determining the area of hydrologic inundation, resulting in the dissolution and degradation of the vulnerable regions induced by land use/cover activities based on the underlying geologic type. Based on the extreme soil erosion vulnerability in the northeast, this study shared common ground with Hembram *et al.* (2019), who noted that soil erosion showed the highest sensitivity to relief characteristics among other contributing morphometric factors. Prior investigations also demonstrated the alarming rate of soil erosion in the high reliefs within the Eastern Cape with similar LU/C patterns and soil types (Phinzi and Ngetar, 2019; Libala *et al.*, 2020; Gwapedza *et al.*, 2021).

The west, southwest, and south of Tyume are relatively flat and low in altitude; however, severe bareness is connected with the built-up area. Tyume South is characterized by a high rate of rural settlement, whose leading economy is dominated by livestock and traditional farming (Fatumo *et al.*, 2021). Chungag *et al.* (2017) noted that Tyume south is characterized by free-range animal husbandry and disturbance of the drainage channel, and physical disaggregation of soil cover and clods contributes significantly to soil erosion vulnerability. Boardman *et al.* (2017) asserted that the current land degradation, which cul-

minates in badlands and gullies, developed from the 200 years of history of overgrazing. Hebinck *et al.* (2018) noted that the Tyume basin has been subject to unguarded continuous communal grazing, which the cattle herders committee politically strengthened from 1847 to 2005. Hence, the bareness and topsoil disturbance rendering the hilly terrain vulnerable to soil erosion is possibly due to the poorly coordinated farm practice and cropland abandonment (Sibiya *et al.*, 2023). The study seeks advocacy for the remediation of sites already degraded by unguarded LU/C activities through afforestation policy, considering the negative response of degraded land to the natural hydrological process and the potential for soil erosion.

The soil erosion vulnerability findings strongly correspond to Mhangara *et al.*'s (2012) findings on soil loss within the Tyume section of the Keiskamma catchment, based on the Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control approach. This study agrees with Mhangara *et al.* (2012) deduction that vegetation enrichment is highly instrumental in soil erosion mitigation. However, Mhangara *et al.* (2012) produced a significant error matrix consistent with the conservation rating factor used. Therefore, this study shows that geology information and terrain ruggedness index are better hybrids than the conservation rating factor used in Mhangara *et al.* (2012) approach, as the error matrix within the extremely rugged area was significantly reduced.

Specifically, this study highlighted the problem of unsustainable land management in the Tyume Basin, which is not strictly driven by nature. Therefore, this study calls on the Department of Environment, Forestry and Fisheries, Department of Water and Sanitation, and other concerned stakeholders to review the policy against human encroachment on the riparian lands and the mutilation of river channels.

5. Conclusions

An integrated framework of soil erosion assessment based on clustering of geo-morphic parameters with land use/ land cover and geology theme has depicted the substantial role of morphometric parameters in the qualitative assessment of soil erosion in areas with topographic complexities. The novelty of the work lies in the selection of GIS-based physiographic themes in achieving a site-specific soil erosion modeling. The following inferences can be drawn from the study:

- The morphometric-based soil erosion model proved reliable in the absence of pluviometric and pedometric data.
- The model provides a qualitative inference of the hotspots and cold-spots of soil erosion vulnerability.
- The study highlights human encroachment, terrain bareness, hillslope farming, and land abandonment as the cogent factors driving soil erosion in the terrain.
- Positional evaluation of the fluvial network orientation, the topographic position index information, and the land use/ land cover deduction provides substantial information on the vulnerability of the riparian environment in the southern section of the Tyume.

Due to resource constraints, a significant limitation in this study is the inability to embark on a field sampling for periodic rainfall data gathering and soil physicochemical properties to corroborate the findings with a spatial distribution map of rainfall erosivity and soil erodibility. However, this is recommended for future research, mainly to undertake a scenario mapping of an improved revised universal soil loss equation with some of the validated morphometric parameters presented in this study. Overall, the present approach is suitable

ble for qualitative soil erosion assessment in a topographically complex environment.

Acknowledgements

We are grateful to Govan Mbeki Research and Development Centre and the Department of Geography and Environmental Science for the extended support that made this research a possibility.

Compliance with ethical standards

This work is entirely a desktop study with a reconnaissance survey for ground-truthing, and therefore, no animal or human participant was involved in the research.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

- Aloui, S., Mazzoni, A., Elomri, A., Aouissi, J., Boufekane, A., Zghibi, A. (2023). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, 326, 116799. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>
- Amatulli, G., McInerney, D., Sethi, T., Strobl, P., Domisch, S. (2020). Geomorpho90m, empirical evaluation and accuracy assessment of global high-resolution geomorphometric layers. *Scientific Data*, 7(1), 1-18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0479-6>
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arumugam, T., Kinattinkara, S., Velusamy, S., Shanmugamoorthy, M., Murugan, S. (2023). GIS based landslide susceptibility mapping and assessment using weighted overlay method in Wayanad: A part of Western Ghats, Kerala. *Urban Climate*, 49, 101508. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101508>
- Avand, M., Kuriqi, A., Khazaei, M., Ghorbanzadeh, O. (2022). DEM resolution effects on machine learning performance for flood probability mapping. *Journal of Hydro-Environment Research*, 40, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.10.002>
- Basga, S.D., Temga, J.P., Tsozué, D., Gove, A., Sali, B., Nguetnkam, J.P. (2020). Erodibility of Vertisols in relation to agricultural practices along a toposequence in the Logone floodplain. *Soil & environment*, 39(1), 1-12. <https://doi.org/10.25252/SE/2020/101855>
- Basson, G., Bosman, E., Vonkeman, J. (2022). Reservoir sedimentation mitigation measures to deal with a severe drought at Graaff-Reinet, South Africa. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 346, p. 03012). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234603012>
- Bhatt, S., Ahmed, S.A. (2014). Morphometric analysis to determine floods in the Upper Krishna basin using Cartosat DEM. *Geocarto International*, 29(8), 878-894. <https://doi.org/10.1080/10106049.2013.868042>
- Biswa, J., Giri, B. (2023). RUSLE and AHP based soil erosion risk mapping for Jalpaiguri district of West Bengal, India. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 89(4), 869-883. <https://doi.org/10.1007/s43538-023-00197-3>
- Boardman, J., Foster, I.D., Rowntree, K.M., Favis-Mortlock, D.T., Mol, L., Suich, H., Gaynor, D. (2017). Long-term studies of land degradation in the Sneeuwberg uplands, eastern Karoo, South Africa: a synthesis. *Geomorphology*, 285, 106-120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.024>
- Busico, G., Grilli, E., Carvalho, S.C., Mastrocicco, M., Castaldi, S. (2023). Assessing Soil Erosion Susceptibility for Past and Future Scenarios in Semiarid Mediterranean Agroecosystems. *Sustainability*, 15(17), 12992. <https://doi.org/10.3390/su151712992>
- Butler, K., 2013. Band combination for Landsat 8. Imagery & Remote sensing. <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/imagery/band-combinations-for-landsat-8/>

- Cassidy, R., Doody, D.G., Watson, C.J. (2017). Impact of legacy soil phosphorus on losses in drainage and overland flow from grazed grassland soils. *Science of the Total Environment*, 575, 474-484. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.063>
- Chungag, A., van Tol, J.J., Magagula, B. (2017). Effect of unguided cattle husbandry on selected soil physical properties in common property regimes in Alice, Eastern Cape Province, South Africa. *Range Management and Agroforestry*, 38(2), 176-180.
- Deribew, K.T., Arega, E., Moisa, M.B. (2024). Prediction of the topo-hydrologic effects of soil loss using morphometric analysis in the upper Bilate watershed. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(5), 162. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03634-9>
- Dimple, Singh, P.K., Kothari, M., Yadav, K.K., Bhakar, S.R. (2023). Multi-criteria decision analysis for groundwater potential zones delineation using geospatial tools and Analytical Hierarchy Process (AHP) in Nand Samand Catchment, Rajasthan, India. *Environment, Development and Sustainability*, 1-35. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03177-1>
- Dijkshoorn, J.A., van Engelen, V.W.P., Huting, J.R.M.I. (2008). *Soil and landform properties for LADA partner countries (Argentina, China, Cuba, Senegal and The Gambia, South Africa, and Tunisia)*. ISRIC report 2008/06 and GLADA report 2008/03, ISRIC – World Soil Information and FAO, Wageningen (23).
- Dutta, A., Ray, R., Banerjee, M. (2024). Multi-criteria-based decision making approach for soil erosion susceptibility modelling of Sali River Basin, Bankura, India. *Environment, Development and Sustainability*, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04736-w>
- Dwivedi, R.S. Ramana, K.V. (2003). The delineation of reclamative groups of ravines in the Indo-Gangetic alluvial plains using IRS-1D LISS-III data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(22), 4347-4355. <https://doi.org/10.1080/0143116031000116994>
- Department of Water and Sanitation (DWS) (2017). *Hydrological services - surface water: Reservoir sites*, <https://www.dwa.gov.za/Hydrology/Verified/HyCatalogue.aspx>.
- Farhan, Y. Nawaiseh, S. (2015). Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 4649-4669. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4430-7>
- Fatumo, D.E., Ngwenya, S., Shibeshi, Z., Aduradola, O.J., Azeez, A.N. (2021). Impact of Information and Communication Technology in Enhancing Food Security in a Rural Area: Alice Community as a Case Study. In *2021 IST-Africa Conference (IST-Africa)* (pp. 1-8). IEEE.
- Flanagan, D.C. Nearing, M.A. (1995). *USDA-Water erosion prediction project: Hillslope profile and watershed model documentation*. National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana, Report No. 10., 12.3 <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/> (accessed 12 October 2020).
- Ghosh, P., Lepcha, K. (2019). Weighted linear combination method versus grid based overlay operation method—A study for potential soil erosion susceptibility analysis of Malda district (West Bengal) in India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(1), 95-115. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.07.002>
- Gwapedza, D., Nyamela, N., Hughes, D.A., Slaughter, A.R., Mantel, S.K., van der Waal, B. (2021). Prediction of sediment yield of the Inxu River catchment (South Africa) using the MUSLE. *International Soil and Water Conservation Research*, 9(1), 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.10.003>
- Halder, S., Roy, M.B., Roy, P.K. (2021). Modelling soil erosion risk of a tropical plateau basin to identify priority areas for conservation. *Environmental Earth Sciences*, 80(18), 646. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09941-8>
- Haokip, P., Khan, M.A., Choudhari, P., Kulimushi, L.C., Qaraev, I. (2022). Identification of erosion-prone areas using morphometric parameters, land use land cover and multi-criteria decision-making method: geo-informatics approach. *Environment, Development and Sustainability*, 24(1), 527-557. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01452-7>
- Hasanuzzaman, M., Mandal, M.H., Hasnine, M., Shit, P.K. (2022). Groundwater potential mapping using multi-criteria decision, bivariate statistic and machine learning algorithms:

- evidence from Chota Nagpur Plateau, India. *Applied Water Science*, 12(4), 58. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01584-9>
- He, X., Miao, Z., Wang, Y., Yang, L., Zhang, Z. (2024). Response of soil erosion to climate change and vegetation restoration in the Ganjiang River Basin, China. *Ecological Indicators*, 158, 111429. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111429>
- Hebinck, P., Mtati, N., Shackleton, C. (2018). More than just fields: Reframing deagrarianisation in landscapes and livelihoods. *Journal of Rural Studies*, 61, 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.01.004>
- Helmi, A.M. (2023). Quantifying catchments sediment release in arid regions using GIS-based Universal soil loss equation (USLE). *Ain Shams Engineering Journal*, 14(8), 102038. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.102038>
- Hembram, T.K., Paul, G.C., Saha, S. (2019). Comparative analysis between morphometry and geo-environmental factor-based soil erosion risk assessment using the weight of evidence model: a study on Jainti River Basin, Eastern India. *Environmental Processes*, 6(4), 883-913. <https://doi.org/10.1007/s40710-019-00388-5>
- Hladky, J., Kynický, J., Dvořáčková, H., Elbl, J., Brtnický, M. (2017). Effect of long-term erosion on humus content and quality on chernozem soils. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17, 179-184. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/32/S13.024>
- Hojati, M., Mokarram, M. (2016). Determination of a topographic wetness index using high resolution digital elevation models. *European Journal of Geography*, 7(4), 41-52.
- Jadidoleslam, N., Mantilla, R., Krajewski, W.F., Goska, R. (2019). Investigating the role of antecedent SMAP satellite soil moisture, radar rainfall and MODIS vegetation on runoff production in an agricultural region. *Journal of Hydrology*, 579, 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124210>
- Jenness, J. (2006) *Topographic Position Index: An Arc View 3.x tool for analyzing the shape of the landscape*. http://www.jennessent.com/arcview/TPI_jen_poster.htm (Retrieved in 2021-08-26).
- Kirkby, M.J. Statham, I. (1975). Surface stone movement and scree formation. *The Journal of Geology*, 83(3), 349-362. <https://doi.org/10.1086/628097>
- Le Roux, J.J. (2012). Gully location mapping at a national scale for South Africa. *South African Geographical Journal= Suid-Afrikaanse Geografiese Tydskrif*, 94(2), 208-218. <https://doi.org/10.1080/03736245.2012.742786>
- Libala, N., Palmer, C.G., Odume, O.N. (2020). Using a trait-based approach for assessing the vulnerability and resilience of hillslope seep wetland vegetation cover to disturbances in the Tsitsa River catchment, Eastern Cape, South Africa. *Ecology and Evolution*, 10(1), 277-291. <https://doi.org/10.1002/ece3.5893>
- Martínez-Murillo, J.F., López-Vicente, M., Poesen, J., Ruiz-Sinoga, J.D. (2011). Modelling the effects of land use changes on runoff and soil erosion in two Mediterranean catchments with active gullies (South of Spain). *Landform Analysis*, 17, 99-104.
- Mhangara, P., Kakembo, V., Lim, K.J. (2012). Soil erosion risk assessment of the Keiskamma catchment, South Africa using GIS and remote sensing. *Environmental Earth Sciences*, 65(7), 2087-2102. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1190-x>
- Morgan, R.P.C., Quinon, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E. (1998). The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(6), 527-544. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23:6<527::AID-ESP868>3.0.CO;2-5)
- Owolabi, S.T., Madi, K., Kalumba, A.M., Orimoloye, I.R. (2020). A groundwater potential zone mapping approach for semi-arid environments using remote sensing (RS), geographic information system (GIS), and analytical hierarchical process (AHP) techniques: a case study of Buffalo catchment, Eastern Cape, South Africa. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06166-0>
- Owolabi, S.T., Madi, K., Kalumba, A.M. (2021a). Comparative evaluation of spatio-temporal attributes of precipitation and streamflow in Buffalo and Tyume Catchments, Eastern Cape, South Africa. *Environment, Development and*

- Sustainability*, 23, 4236–4251. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00769-z>
- Owolabi, S.T., Madi, K., Kalumba, A.M., Baiyegunhi, C. (2021b). A geomagnetic analysis for lineament detection and lithologic characterization impacting groundwater prospecting; a case study of Buffalo catchment, Eastern Cape, South Africa. *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100531. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100531>
- Owolabi, S.T., Belle, J.A., Mazinyo, S. (2022). Quantifying intra-catchment streamflow processes and response to climate change within a climatic transitional zone: a case study of Buffalo catchment, Eastern Cape, South Africa. *Mathematics*, 10(16), 3003. <https://doi.org/10.3390/math10163003>
- Owolabi, S.T. Belle, J.A. (2023). Investigating extreme hydrological risk impact on water quality; evidence from Buffalo catchment headwater, Eastern Cape, South Africa. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27048-4>
- Pal, S. (2016). Identification of soil erosion vulnerable areas in Chandrabhaga river basin: a multi-criteria decision approach. *Modelling Earth Systems and Environment*, 2, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0052-z>
- Parwada, C., Van Tol, J. (2016). The nature of soil erosion and possible conservation strategies in Ntabelanga area, Eastern Cape Province. *Acta Agriculturae Scandinavica - Section B Soil and Plant Science*, 66(6), 544-552. <https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1188979>
- Phinzi, K. Ngetar, N.S. (2019). Land use/land cover dynamics and soil erosion in the Umzintlwa catchment (T32E), Eastern Cape, South Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 74(3), 223-237. <https://doi.org/10.1080/035919X.2019.1634652>
- Pimentel, D. (2010). Corn and cellulosic ethanol problems and soil erosion. Soil quality and biofuel production, In R Lal and B. A. Stewart (Eds). *Soil quality and biofuel production*, CRC Press, Boca Raton, 119–135.
- Rahman, M.R., Shi, Z.H., Chongfa, C. (2009). Soil erosion hazard evaluation—an integrated use of remote sensing, GIS, and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecological Modelling*, 220(13-14), 1724-1734. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.04.004>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, J.P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soils and Water Conservation*, 46(1), 30-33.
- Riley, S.J., DeGloria, S.D., Elliot, R. (1999). Index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5(1-4), 23-27.
- Robb, L.J., Brandl, G., Anhaeusser, C.R., Poujol, M., Johnson, M.R., Thomas, R.J. (2006). Archaean granitoid intrusions. *South African Journal of Geology*, 57-94.
- Różycka, M., Migoń, P., Michniewicz, A. (2017). Topographic wetness index and terrain ruggedness index in geomorphic characterization of landslide terrains, on examples from the Sudetes, SW Poland. *Zeitschrift für geomorphologie*, Supplementary Issue, 61(2), 61-80. https://doi.org/10.1127/zfg_suppl/2016/0328
- Sappington, J.M., Longshore, K.M., Thompson, D.B. (2007). Quantifying landscape ruggedness for animal habitat analysis: a case study using bighorn sheep in the Mojave Desert. *The Journal of Wildlife Management*, 71(5), 1419-1426. <https://doi.org/10.2193/2005-723>
- Sarkar, S., Kanungo, D.P. (2004). An integrated approach for landslide susceptibility mapping using remote sensing and GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(5), 617-625. <https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.617>
- Schillaci, C., Jones, A., Vieira, D., Munafò, M., Montanarella, L. (2023). Evaluation of the United Nations Sustainable Development Goal 15.3. 1 indicator of land degradation in the European Union. *Land Degradation Development*, 34(1), 250-268. <https://doi.org/10.1002/ldr.4457>
- Sharma, A. (2010). Integrating terrain and vegetation indices for identifying potential soil erosion risk area. *Geospatial Information Science*, 13(3), pp.201-209. <https://doi.org/10.1007/s11806-010-0342-6>
- Shen, H., Zhenga, F., Wen, L., Han, Y., Hu, W. (2016). Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope. *Soil and Tillage Research*, 155, 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.09.011>

- Shtober-Zisu, N., Brook, A., Zissu, B. (2024). Soil denudation in the northwestern Negev (Israel) following the Late Byzantine–Early Islamic period. *Geomorphology*, 446, 108983. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108983>
- Sibiya, S., Clifford-Holmes, J.K., Gambiza, J. (2023). Drivers of Degradation of Croplands and Abandoned Lands: A Case Study of Macubeni Communal Land in the Eastern Cape, South Africa. *Land*, 12(3), 606. <https://doi.org/10.3390/land12030606>
- Smith, M.W. (2014). Roughness in the earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 136, 202-225. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2014.05.016>
- Smith, P., Calvin, K., Nkem, J., Campbell, D., Cherubini, F., Grassi, G., Korotkov, V., Le Hoang, A., Lwasa, S., McElwee, P., Nkonya, E. (2020). Which practices co-deliver food security, climate change mitigation and adaptation, and combat land degradation and desertification? *Global Change Biology*, 26(3), 1532-1575. <https://doi.org/10.1111/gcb.14878>
- Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Streiner, D.L., Cairney, J. (2007). What's under the ROC? An introduction to receiver operating characteristics curves. *Canadian Journal of Psychiatry*, 52(2), 121-128. <https://doi.org/10.1177/070674370705200210>
- Ugwu, I.E., Emmanuel, K., Vintus, O. (2024). Evaluating the Impacts of Soil Erosion on Selected Hillslopes in UNN Using WEPP Model. *UNIZIK Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 567-572.
- van Leeuwen, C.C., Cammeraat, E.L., de Vente, J., Boix-Fayos, C. (2019). The evolution of soil conservation policies targeting land abandonment and soil erosion in Spain: A review. *Land Use Policy*, 83, 174-186. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.018>
- Verbakel, J.Y., Steyerberg, E.W., Uno, H., De Cock, B., Wynants, L., Collins, G.S., Van Calster, B. (2020). ROC curves for clinical prediction models part 1. ROC plots showed no added value above the AUC when evaluating the performance of clinical prediction models. *Journal of Clinical Epidemiology*, 126, 207-216. <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2020.01.028>
- Vieira, A., Oyguc, R. (2024, eds.). *Current Perspectives on Applied Geomorphology*. BoD – Books on Demand, London, 112 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100708>
- Vrieling, A., Sterk, G., Vigiak, O. (2006). Spatial evaluation of soil erosion risk in the West Usambara Mountains, Tanzania. *Land Degradation Development*, 17(3), 301-319. <https://doi.org/10.1002/ldr.711>
- Weiss, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, *ESRI user conference*, San Diego, CA (Vol. 200).
- Wilson, A., Flint, S., Payenberg, T., Tohver, E., Lanci, L. 2014. Architectural styles and sedimentology of the fluvial lower Beaufort Group, Karoo Basin, South Africa. *The Journal of Sedimentary Research*, 84(4), 326-348. <https://doi.org/10.2110/jsr.2014.28>
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning* (No. 537). Department of Agriculture, Science, and Education Administration.
- Yue, L., Juying, J., Bingzhe, T., Binting, C., Hang, L. (2020). Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the Loess Plateau region, China. *Journal of Hydrology*, 584, 124694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124694>
- Zengeni, R., Kakembo, V., Nkongolo, N. (2016). Historical rainfall variability in selected rainfall stations in Eastern Cape, South Africa. *South African Geographical Journal= Suid-Afrikaanse Geografiese Tydskrif*, 98(1), 118-137. <https://doi.org/10.1080/03736245.2014.977811>
- Zhang, Y., Jiang, Y., Sun, X., Li, H., Yuan, C., Liu, H., Liu, J., Mello, C.R., Boyer, E.W., Guo, L. (2024). The hydrologic nature of swales uncovers remarkable influence of non-topographic factors on catchment-scale soil moisture variation. *Journal of Hydrology*, 635, 131196. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131196>

Recibido el 18 de julio de 2023

Acceptado el 29 de octubre de 2024



Instream sediment mining in Chilean rivers: review and management proposal

Extracciones de sedimento en ríos chilenos: revisión y propuesta de gestión

Mondlhane, C.⁽¹⁾; Barros-Parada, W.⁽¹⁾; Mao, L.^(2,3); Piqué, G.^(4,1) *

(1) Escuela de Agronomía, Facultad de Ciencias Agronómicas y de los Alimentos, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. San Francisco s/n, La Palma - Quillota, Chile

(2) Department of Geography, Catchments and Coasts Research Group, University of Lincoln, Brayford Pool Campus, Lincoln, LN6 7TS, UK

(3) Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Campus San Joaquín, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

(4) Forest Science and Technology Centre of Catalonia (CTFC), Ctra. Sant Llorenç de Morunys, km 2, 25280 - Solsona, Spain.

Abstract

The effects of instream sediment mining have been widely described in the literature. Although this activity has been strictly regulated in some countries, other countries still register an increasing number of sediment mining extractions, as is the case of Chile. The goal of this work is to study the current state of instream gravel mining in Chile, describing the current legislation in the country. The results showed an increasing trend in the number of approved projects, and although present in the whole country, a large proportion were located in the central and southern regions, led by Ñuble Region. The regulation of mining activities in the country is currently managed and evaluated by the municipal government where the extraction is located, after an evaluation from the Department of River Works, which has led to an over-extraction situation in some rivers. Within this context, there has been a raise in the Chilean society awareness regarding environmental issues, accompanied by the identification of the main negative impacts of sediment mining from fluvial systems. Recently, the Chilean government has been discussing a new instream sediment mining law, with the aim to standardise the regulations and incorporating a socio-environmental vision in the evaluation of these projects.

Keywords: sand mining, gravel mining, legislation, Chile.

* Correspondence: gemma.pique@ctfc.cat



Resumen

Los efectos de las extracciones de áridos en ríos han sido ampliamente estudiados en la literatura. Aunque esta actividad ha sido estrictamente regulada en algunos países, en otros todavía incrementa el número de extracciones, como es el caso de Chile. El objetivo de este trabajo es estudiar el estado actual de las extracciones de áridos en ríos chilenos, describiendo también la legislación actual del país. Los resultados mostraron una tendencia creciente en el número de proyectos aprobados y, aunque están presentes en todo el país, una gran parte de ellos se ubican en la región centro-sur, siendo Ñuble la región con un mayor número de extracciones. La regulación de las actividades de extracción de áridos en Chile se gestiona y evalúa por parte de los gobiernos municipales, después de una evaluación por parte del Departamento de Obras Fluviales, lo que ha conllevado una sobre-extracción de sedimento en algunos ríos. En este contexto, la sociedad chilena ha experimentado un incremento en la concienciación ambiental, acompañada de la identificación de los principales efectos de las extracciones de áridos en ríos. Recientemente, el gobierno chileno ha discutido una modificación de la ley de extracciones de áridos, con el objetivo de estandarizar la regulación de esta actividad e incorporar una visión socio-ambiental en la evaluación de estos proyectos.

Palabras clave: extracciones de arenas, extracciones de gravas, legislación, Chile.

1. Introduction

Over the past decades, natural resources have been exploited on such a large and widespread scale that derived in long-lasting consequences. The pervasive action of humans can be systematically recognised on sedimentary records (Owens, 2020), and the increasing dominance of human activities on sedimentary Earth system processes changed so much that they no longer resemble those of the Holocene (Cendrero *et al.*, 2022). For example, Syvitski *et al.* (2022) recently reported that human activities have increased fluvial sediment delivery by 215%, while simultaneously decreasing the amount of fluvial sediment that reaches the ocean by 49% due to river damming, and societal consumption of sediment, mainly sediment mining, over the same period has increased by more than 2,500%.

Sediments are used in a range of human activities and domestic and industry production processes, and with population growth, which is expected to reach about 9.7 billion inhabitants in 2050 (Simanjuntak *et al.*, 2023), the demand of these resources is likely to increase, reaching a point at which it will exceed the rate of natural renewal (Bendix-

en *et al.*, 2021). Along with other resources, sand and gravels have an important role in construction, which lead to large extractions of sedimentary material from mining areas, especially in fast developing countries. According to the UNEP (2014), sand and gravel mining represent the highest volume of raw material used on Earth after water, and that may continue growing as it is a global phenomenon, especially intense in countries registering a rapid urban growth (Sear and Archer, 1998; Bendixen *et al.*, 2021).

Although the origin of aggregates may vary depending on the geographic context, in many cases they are obtained directly from alluvial deposits since it has some advantages with respect to other mining sites (Kondolf, 1994a; Sear and Archer, 1998). As stated by Kondolf (1994b), the main advantages are: (i) the material is durable, rounded, well-sorted, and relatively free of interstitial fine sediment; (ii) the source of material is generally located near the markets for the product, what reduces transportation costs; and (iii) the extraction and processing of material in instream mining has a relatively low cost and the sediments are expected to be periodically replaced from upstream during high flow events. Although sediments can be extracted

from moraines, terraces and abandoned alluvial fans, in most cases they are extracted from riverine areas (i.e., floodplains, bars, and active channels). River mining activities usually result in significant consequences along the river that may last from decades to hundreds of years (Hayer and Irwin, 2008; Arróspide *et al.*, 2018). Sand and gravels from rivers are usually extracted with heavy equipment either from pits in floodplains and terraces, or directly from the riverbed (i.e., instream mining; Kondolf *et al.*, 2001). Although floodplain mining may have important effects on the fluvial ecosystem (Kondolf, 1994a), the effects of instream gravel mining are detrimental for rivers due to the consequent physical, chemical, and biological changes in the stream ecosystem. Instream gravel mining usually causes upstream and downstream channel incision (Wyźga, 2001; Batalla, 2003; Brestolani *et al.*, 2014; Kiss *et al.*, 2017), lateral channel instability (Roberge, 2002), alteration of substrate composition and stability (Hajdukiewicz and Wyźga, 2018), water table lowering (Rinaldi *et al.*, 2005), punctual increase in sediment load and turbidity (Hayer and Irwin, 2008; Béjar *et al.*, 2017), alteration of physical and chemical water characteristics (Hayer and Irwin, 2008), loss of riparian and aquatic habitats (Asabonga *et al.*, 2017), and changes in stream structure and function (Carling, 1984; Brown *et al.*, 1998; Rempel and Church, 2009; Mori and Brancelj, 2011; Mori *et al.*, 2011; Booth *et al.*, 2020). Some of these impacts, in particular river incision, can result in damage to bridges and other infrastructure due to a reduction in load-bearing capacity, eventually leading to their collapse (Kondolf, 1997; Rinaldi *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2018). In addition to environmental and ecological problems, river mining thus contributes to the increasing vulnerability of critical infrastructure (Kondolf, 1997).

Given the increasing body of evidence demonstrating the negative long-term consequences on riverine ecosystems, instream sand and gravel mining is strongly regulated in countries such as Portugal, Italy, Spain, New Zealand, USA, and Canada, and is mostly

banned in countries such as France, Holland, UK, Germany, and Switzerland (Kondolf, 1997; Gavriletea, 2017). However, the number and size of instream gravel mining sites have progressively increased in the last years in fast developing regions (e.g., Latin America), mainly because of the urban expansion and land use changes. Instream sand and gravel mining in Chile is still permitted, due to the need for building material and, therefore, Chilean rivers are becoming increasingly affected by this activity (Fig. 1). Despite the wide and intense presence of river mining sites in the country, very few studies analysed the current state of this activity. Many recent studies reported on the characterization of the hydro-morphological patterns of Chilean rivers (Bañales-Seguel *et al.*, 2020; Ulloa *et al.*, 2020; Habit *et al.*, 2022) and human impacts due to dam closure (Alcayaga *et al.*, 2019, Villablanca *et al.*, 2023) and flow regulation (e.g., Pacheco *et al.*, 2022), but only Arróspide *et al.* (2018) evaluated the effects of instream gravel mining in a 22 km-long reach in a Chilean river. Specifically, these authors assessed gravel extractions on the morphological characteristics (e.g., active channel width, variation in thalweg elevation, connectivity) in the Maipo river, reporting striking evidence such as recent narrowing in the range of 15 m per year and incisions as high as 35 cm per year. They also reported that gravel mining area increased by 325% from 1998 to 2018.

The goal of the present work is to study the state of instream gravel mining in Chile. Due to the lack of published data, there are no works assessing the potential effects of instream sediment mining in Chile. Hence, this work is the first attempt of establishing the conceptual frame and the state of the art of this activity in the country. The specific objectives of the study are: (i) to describe the distribution and evolution of instream sediment mining in Chile according to official data, and (ii) to analyse the current regulations and rules related to the sand and gravel mining industry in Chilean rivers. For the specific objective (ii), a review of the instream aggregate mining legislation was included for contextualisation. In addition

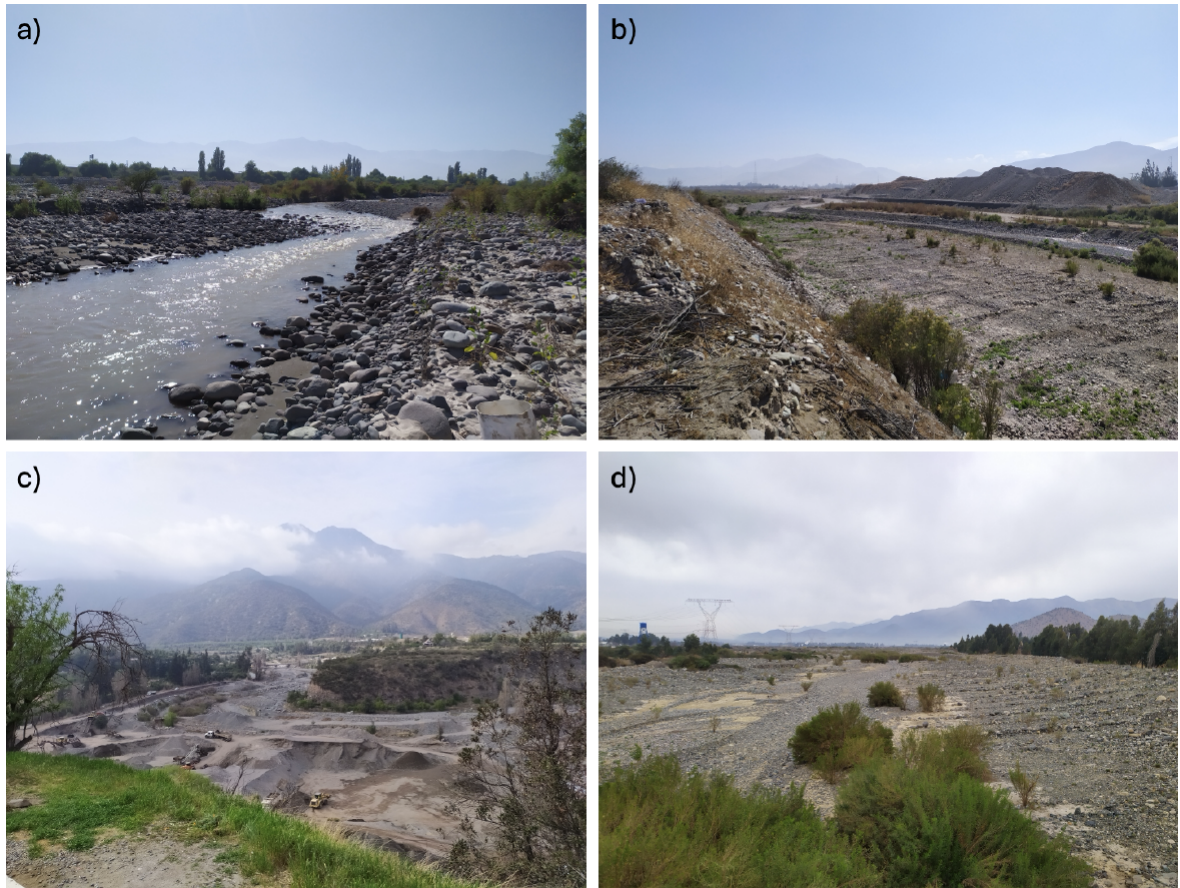


Figure 1. Gravel mining sites in Chilean rivers that reflect the simplified morphology and the lack of sediment in these river reaches. a) Aconcagua river (Región de Valparaíso); b) Aconcagua River (Región de Valparaíso); c) Maipo River (Región Metropolitana); and d) Peuco River (Región del Libertador Bernardo O'Higgins).

Figura 1. Extracciones de áridos en ríos chilenos que reflejan la morfología simplificada y la falta de sedimento en los tramos de río. a) Río Aconcagua (Región de Valparaíso); b) Río Aconcagua (Región de Valparaíso); c) Río Maipo (Región Metropolitana); and d) Río Peuco (Región del Libertador Bernardo O'Higgins).

to highlight the gaps of current research on river sediment mining in the country, this work is expected to contribute to the informed public discussion on the topic that is going on in the country, and lead to monitoring and research programs to facilitate decision-making and planning of these activities.

2. River sediment mining legislation in Chile

The administrative setting and legislations on water and river management in Chile is rather complex and involves many governmental

agencies involved in the system (Valdés-Pineda *et al.*, 2014). Moreover, the current legislation on river gravel mining in Chile is abundant but dispersed in different legal and regulatory bodies (Orrego *et al.*, 2016), and it lacks a detailed definition of what is to be considered gravel or aggregate (Figueroa, 2000; Bermúdez Soto, 2007), which generates difficulties in terms of interpretation of existing regulations. In fact, under the current legislation, clays, sands and gravels are not considered minerals and are therefore not affected by the Mining Law (*Ley de Minería*) but are subjected to other administrative bodies

depending on the property of the land (i.e., private or public). If the land is private, the governing law is the Civil Law (*Código Civil*), and when the land is public, it must be differentiated between national assets for public use and fiscal assets. Rivers are national assets for public use and its administration and management depends on municipal governments (Valdés-Pineda *et al.*, 2014). Instream sediment mining has been regulated by the law about river and stream beds (Law 11.402 (1953) about river and stream beds and banks; Romero *et al.*, 2014). This law establishes that although the local government is the responsible for granting the permissions for mining activities, the activities related to instream aggregates extraction require a technical approval from the Hydraulic Works Authority (*Dirección de Obras Hidráulicas, Ministerio de Obras Públicas*).

Also, due to the potential environmental impact of this activity, the Law 19.300 of 1994 (General Bases for the Environment), in its article 10 - letter *i* - 5.2, established the required approval of the gravel extraction project by the SEIA when sediments are obtained from rivers or other water bodies and the total extracted volume is higher than 20,000 m³ in the northern regions (from Arica to Coquimbo), or higher than 50,000 m³ in the southern regions (from Valparaíso to Magallanes). These are considered as 'industrial' extractions. The SEIA (*Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*, which is the Chilean Environmental Impact Assessment System in English) has the function to assess the alterations or impacts that the proposed activities will or may influence the environment and, according to the evaluation, approve or disapprove them. There is no defined procedure in the legislation for obtaining the referred permits, depending on the municipal ordinances (Figueroa, 2000). However, the basis of the procedure tends to be the same in all cases, consisting of three phases: (i) the application, (ii) the report of the Department of River Works (DOF, *Departamento de Obras Fluviales*), and (iii) the constitutive resolution. The application to the pertinent municipality

(i) consists on the submission and evaluation of complementary studies on the area of the project: i.e., topography, aerial photography, hydrological analysis, hydraulic study, erosion assessment, and a detailed extraction program. Also, according to Law 19.300, and depending on the potential risks of the activity, an Environmental Impact Statement (EIS) or an Environmental Impact Assessment (EIA) is needed for its approval. The DOF (ii) requires the issuing of a technical report once the respective Municipality confirms that all the requirements of the application have been met. This report is mandatory according to Article 11 of Law 11.402. The constitutive resolution (iii) consists on the Mayor pronouncement with the agreement of the Municipal Council (Figueroa, 2000). The technical requirements depend on the aggregate extraction process, whether industrial or not. For non-industrial exploitation, minimum operating guidelines and conditions are required, and these are based on the characteristics of the river reach to be exploited and on other elements pointed out by the DOF. For industrial extraction, an environmental impact assessment and compliance with current environmental regulations are mandatory. Although the process is well-established, there is the risk of incorrect use of the permits, since some extraction projects can either be fragmented or underestimated the amounts of material planned to extract to avoid the SEIA evaluation.

Since 2022, the Chilean government has been working on a draft for an updated legislation for aggregate mining, with the aim of generating a general policy framework for Chile to ensure an effective and efficient regulation of this activity (proposal of *Ley Áridos*, Boletín 15.096-09 and Boletín 15.676-09), which should be considered in the context of a basin (i.e., included in watershed management plans and land-use planning). The Senate approved the creation of this new general policy framework for the aggregate extraction in the beginning of 2024, and is currently being processed. In this recent law proposal, the definition of aggregates is extended, and specifies that clay, sands, gravels and other aggregate

materials directly used in construction would be under the effects of this law. The aim of this law is to standardize the regulation related to aggregate extractions, with control of the origin and tracking of the aggregates. The proposal includes a socio-environmental vision with, for instance, the consideration of environmental studies when evaluating the applications or the obligation to mitigate the effects once the activity is finished. Moreover, the proposal incorporates the regulation of river aggregates, according to the river dynamics and condition.

3. Methods

To assess the distribution of the instream mining sites in Chile, a search of submitted and implemented instream mining projects in the database of the Environmental Evaluation Service (SEA, *Servicio de Evaluación Ambiental*, in Spanish) up to December 2021 was carried out. The SEA is a functionally decen-

tralized public institution with legal personality that is responsible for determining the suitability of an activity according to the Chilean environmental legislation. This institution was created by Law Nr. 20.417, published in the Official Gazette on January 26th 2010, which amended Law Nr. 19.300 on General Bases of the Environment. According to the legislation, the activities with significant environmental impacts require an Environmental Impact Study, while the other activities only require an Environmental Impact Statement, as mentioned above.

The search of the submitted and approved instream mining projects was carried out using the advanced search of the online platform in the SEA webpage (<https://seia.sea.gob.cl/busqueda/buscarProyecto.php>). The mining projects were selected and, among them, the search was narrowed to mining projects including coal, oil, exploration, mining, processing plants and waste and tailings disposal, and industrial extraction of aggregates, peat or

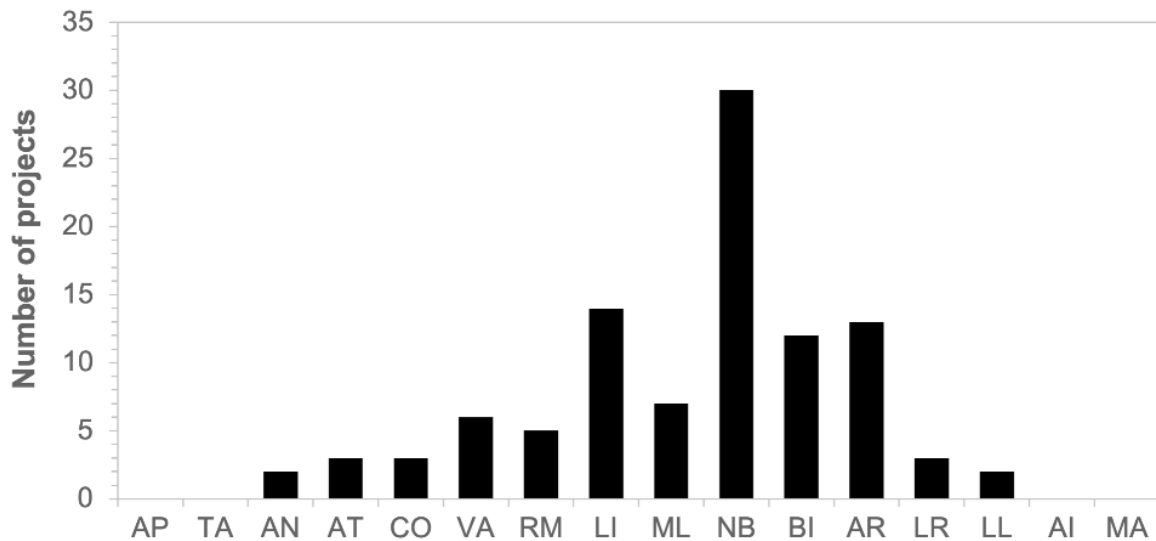


Figure 2. Distribution of approved instream mining projects per region from North to South (1997-2021). AP: Arica y Parinacota; TA: Tarapacá; AN: Antofagasta; AT: Atacama; CO: Coquimbo; VA: Valparaíso; RM: Región Metropolitana; LI: Libertador General Bernardo O'Higgins; ML: Maule; NB: Ñuble; BI: Biobío; AR: Araucanía; LR: Los Ríos, LL: Los Lagos; AI: Aysen; MA: Magallanes.

Figura 2. Distribución de proyectos aprobados de extracción de áridos en ríos por región de Norte a Sur (1997-2021). AP: Arica y Parinacota; TA: Tarapacá; AN: Antofagasta; AT: Atacama; CO: Coquimbo; VA: Valparaíso; RM: Región Metropolitana; LI: Libertador General Bernardo O'Higgins; ML: Maule; NB: Ñuble; BI: Biobío; AR: Araucanía; LR: Los Ríos, LL: Los Lagos; AI: Aysen; MA: Magallanes.

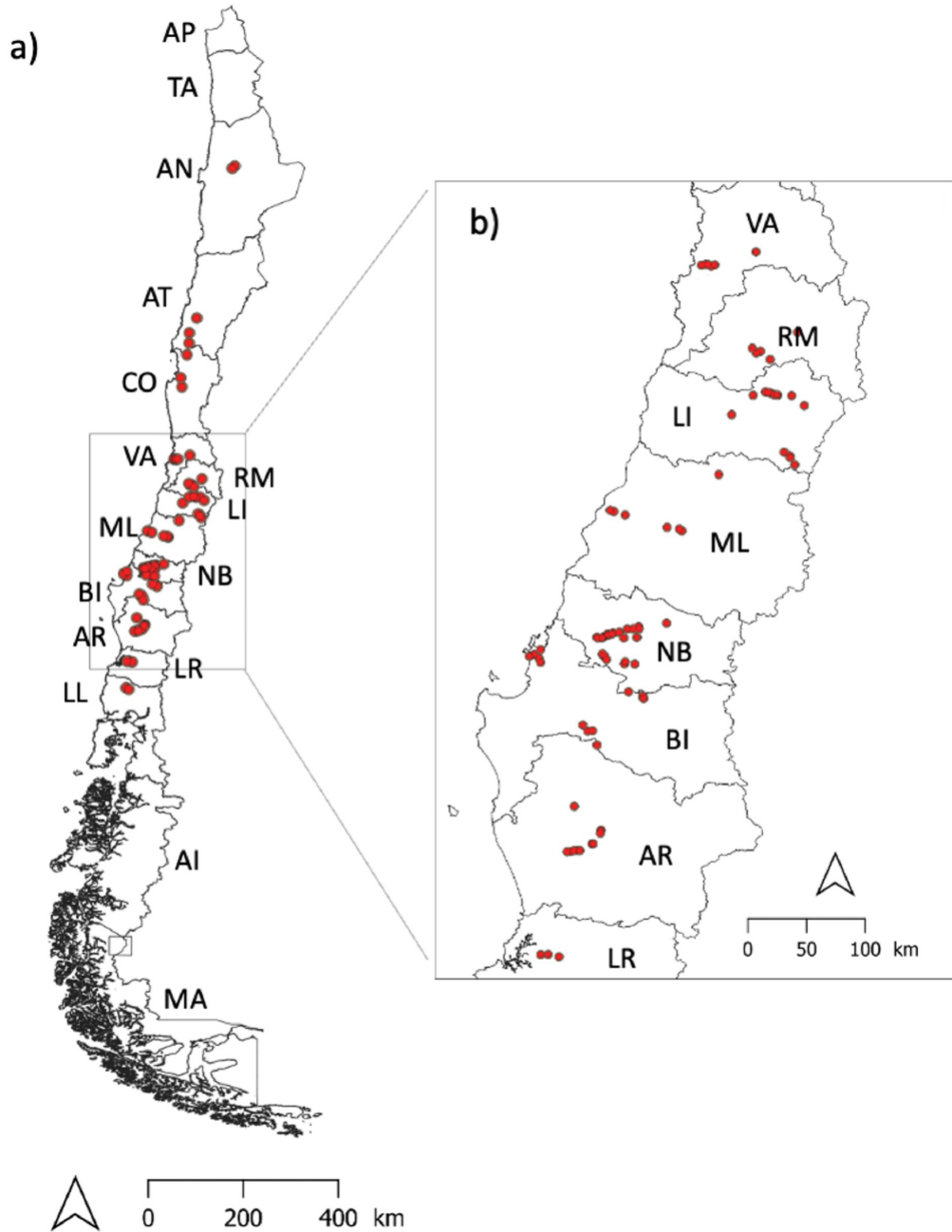


Figure 3. a) Distribution of approved instream mining projects per region (1997-2021); b) Zoom to the regions with higher concentration of mining sites. AP: Arica y Parinacota; TA: Tarapacá; AN: Antofagasta; AT: Atacama; CO: Coquimbo; VA: Valparaíso; RM: Región Metropolitana; LI: Libertador General Bernardo O'Higgins; ML: Maule; NB: Ñuble; BI: Biobío; AR: Araucanía; LR: Los Ríos, LL: Los Lagos; AI: Aysen; MA: Magallanes.

Figura 3. a) Distribución de proyectos aprobados de extracción de áridos en ríos por región (1997-2021); b) Ampliación del mapa de las regiones con mayor densidad de extracciones. AP: Arica y Parinacota; TA: Tarapacá; AN: Antofagasta; AT: Atacama; CO: Coquimbo; VA: Valparaíso; RM: Región Metropolitana; LI: Libertador General Bernardo O'Higgins; ML: Maule; NB: Ñuble; BI: Biobío; AR: Araucanía; LR: Los Ríos, LL: Los Lagos; AI: Aysen; MA: Magallanes.

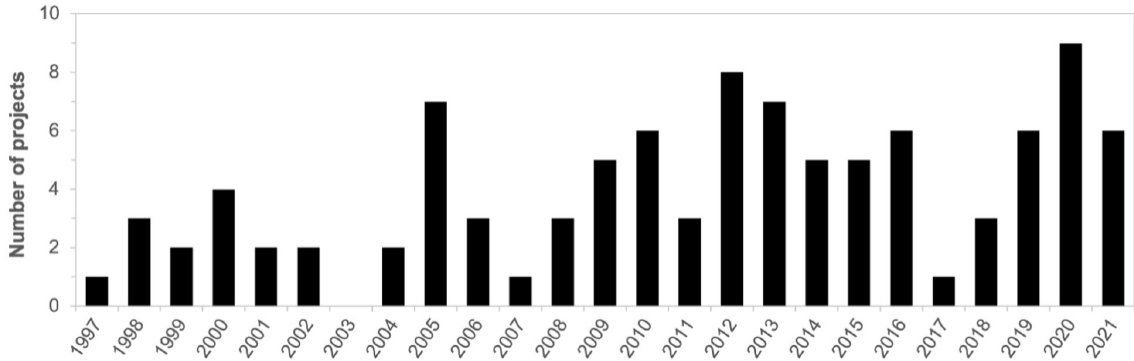


Figure 4. Evolution of approved instream mining projects in Chile (1997-2021).

Figura 4. Evolución de proyectos aprobados de extracción de áridos en ríos en Chile (1997-2021).

chalk. The search was refined to the selection of only those projects related to the extraction of aggregates, resulting in 524 projects. Among them, 224 project were accepted or on qualification at the time of data processing, while the others had been withdrawn, rejected, or not admitted for processing. A one-by-one visual screening using Google Earth Pro^R was then performed to identify and select only the mining sites located in rivers or next to rivers. This process resulted in a total of 100 approved instream mining sites. All these 100 sites are considered as 'industrial' due to the volume planned to be extracted, which include the extractions of sediment bigger than 20,000 m³ or 50,000 m³ depending on the region.

4. Results: the distribution and evolution of instream mining in Chile

According to the projects submitted to the SEIA from 1997 to 2021, the Ñuble region concentrated most of the gravel extraction projects (30 projects), followed by Libertador General Bernardo O'Higgins, Araucanía and Biobío regions (14, 13 and 12 projects, respectively; Fig. 2 and Fig. 3). These four regions are in the central part of the country, together with Maule region that had a lower number of river mining sites.

Although there is a high variability in the number of approved projects per year, an

increasing trend can be observed from 1997 to 2010, and a decreasing trend from 2012 to 2021 (Fig. 4). Despite the high number of approved projects, the rate of growth showed some recessive stages from year 2006 to 2008 (Fig. 4), which could be due to transitory and short disturbances from other sources of the economy, as the recession in Chile between 2008 and 2009, generated by the systemic effect of the international financial crisis (Cerdeira and Vergara, 2008).

5. Discussion

5.1. Instream mining in Chile

Although 100 river aggregate mining sites were identified after the search in the SEIA, according to the Chilean Ministry of the Environment (MMA, 2022), 330 gravel mining projects have been approved between 1997 and 2021, and up to 20% of these projects will run until 2030. However, according to Alvarez Mardones (2019), only 245 legal instream gravel mining exploitation projects began between 1997 to 2019. This fact could be explained because, according to the Law Nr. 19.300, only industrial gravel extractions (i.e., $\geq 20,000$ m³ in the case of regions from Arica y Parinacota to Coquimbo or $\geq 50,000$ m³, from Valparaíso to Magallanes and Antártica Chilena regions, including the Metropolitan Region, during the useful life of the project) must be evaluated by the SEIA.

Most of the population in Chile is concentrated in the central part of the country (i.e. from Región de Valparaíso to Región de la Araucanía inhabits the 79% of the population), but most of the mining sites were located from Región del Libertador Bernardo O'Higgins to Región de la Araucanía. In fact, most of the aggregates obtained are being commercialised in the Metropolitan, Biobío and Valparaíso regions (CChC, 2022), which concentrate the 60% of the population in the country. This distribution of extractions may be due to the high urban population living in the Metropolitan and Biobío regions (INE, 2018) where the demands of raw material are thus higher. Connections between the regions with a higher number of instream mining sites and regions with higher population are easy through the central valley in the country. In fact, most of the mining sites are located in this central valley, where most of the main cities are located, and river reaches there are characterised by low slopes and appropriate sediment grain sizes for construction, in comparison to the river reaches in the confined valleys of the mountain range (higher slopes and larger sediment particles not ready to use in construction). Accessibility is also important, and all those regions are under the influence of the Mediterranean climate and river reaches in the central valley have a hydrological regime characterised by a long period of low discharges in summer, or are located downstream from a reservoir, thus with low flows most of the year. Both of these situations with low water level in the river facilitate the accessibility to river sediments.

Despite that instream mining is widespread in Chile, scientific research about its impacts on the rivers in the country is still rather limited. To the best of our knowledge, only Arróspide *et al.* (2018) assessed the effects of instream mining in the country, focusing on the morphological effects of this activity in the Maipo river (Metropolitan Region, Central Chile). The Maipo river is of high interest in the country since (i) it concentrates the largest amount of instream gravel mining activities in the country (Arróspide *et al.*, 2018), (ii) the region con-

centrates more than the 40% of the national population (INE, 2018), and (iii) economically, it is one of the most important rivers in the country as it provides drinking and irrigation water to both urban and rural areas, generates electricity, and runs along and below critical infrastructure (Cai *et al.*, 2006). Consequently, the Maipo river is impacted by other anthropic activities, such as dams, power plants, water diversion structures, deforestation, or pollution due to agriculture. The negative effects of gravel mining may not be immediately recognized due to the degree of resilience that each river systems holds (e.g., scour in bridges that can lead to collapse), but when the extractions exceed the natural replenishment for several years, the morphological consequences in terms of river incision may affect infrastructures in a way that becomes obvious to non-experts too. Scour phenomenon can be caused by many factors, such as excessive extraction of aggregates from the neighbouring riverbeds, and may cause structural problems to infrastructures located in the riverbed. For instance, Muñoz *et al.* (2009) assessed the cause of concrete bridges collapse in Colombia between 1986 to 2001, and found that 24% of them collapsed due to scour effects. More recently in Chile, the collapse of the Cancura bridge in the river Rahue (Los Lagos Region) in 2018 has been associated with excessive gravel extraction. Also, sediment extraction works in the Maipo River are in the spotlight of local communities since a heavy degradation of the river was reported by the *Dirección de Obras Hidráulicas* in 2015.

Chile is registering a rapid urban and industrial growth (the number of houses has increased in a 90% in the last 30 years; MINVU, 2021), which may increase the demand of aggregates, affecting those extractions from river systems. This has been traditionally associated to a lack of public opposition due to little awareness about the environmental effects of instream gravel activity. However, and despite the scientific literature on the topic is scarce in Chile, there has been an increase in environmental concern in the recent years, also in relation to the consequences of in-

stream mining. This has been reflected in the news, raising knowledge and informing about the reports for illegal instream mining activities (see Supplementary material).

5.2. Adapting management proposals for instream mining in Chile

In the current legislation, the environmental evaluation of instream mining projects in Chile is only required when a certain volume of sediments is planned to be extracted (i.e. 400 m³ per day or 50,000 m³ in total). This threshold value is common for several rivers, and hence is not based on the nature of each individual river reach; i.e., bedload transport rates, sediment availability, sediment connectivity between generation areas and the channel. In fact, the criteria to authorise the volume of sediments to be extracted should be based on the characteristics of each river or river reach, according to an established criterion. One of the most used criteria is the consideration of a 'replenishment rate', i.e., limiting the annual extraction to the mean annual bedload supply from upstream, so that no more sediment is extracted than is supplied by the river (Kondolf *et al.*, 2001). The application of this criteria requires the quantification of the bedload supply from upstream for each river reach where the instream gravel extractions are planned, as bedload transport rates are highly variable between rivers depending on the sediment grain size and physical characteristics of the basin and/or stream. Also, bedload supply is highly variable from year to year due to the intrinsic variability of the hydrology of the river, and because this process only occurs during high flows or floods, mainly in the latter. As ideally the long-term mean bedload transport value is commonly used as the limit to gravel extraction, the described high annual variability implies that the 'replenishment' of the hole/space caused by instream mining would not be achieved every year (Dunne *et al.*, 1981). Furthermore, this approach does not prevent sediment deficit downstream from the mining site (Kondolf *et al.*, 2001), since a negative sediment budget

will occur, i.e., the sediment from upstream will replace the volume extracted at some point, but no (or less) sediments will be transported downstream, hence reducing the total volume being transported by the flow. It has been stated the importance of quantifying the natural bedload transport rates of rivers prior to the authorisation of instream gravel extractions. However, the number of scientific works assessing bedload transport is scarce for Chile. Only a few scientific articles have measured bedload transport in Chilean rivers, i.e. Martín-Vide *et al.*, (2015) in the Toltén and Allipén rivers in the South, Carrillo and Mao (2020) in the Estero Morales in Central Chile, and Mao (2023) in the Silala river in the North of the country, while Pham Van and Chua (2020) used the data from the Toltén river to model bedload transport.

The issuing of permits for instream mining should not only consider the river reach where the sediments will be extracted, but also the other human activities being supported by the river system (i.e. watershed management plans, with a holistic view of the basins and their activities). Anthropogenic activities have an impact on the territory and their effects can accumulate, in the case of rivers from upstream to downstream. Hence, instream mining in rivers with other activities affecting sediment dynamics may exacerbate the impacts downstream. This could be the case, for instance, in a river basin with several river mining sites, or in rivers regulated by one or more dams.

Since the natural process of geomorphic adjustment may take many decades and even centuries to recover without human intervention (Booth *et al.*, 2020), the law should include the obligation to restore the mining site and the affected river channel after the useful life of the project. The restoration or rehabilitation of the fluvial zone should consider both the active channel and the riparian zone, with a specific project for each river reach. These restoration actions need to be focused on river morphology creating a heterogeneity within the river and facilitating the development

of riparian vegetation community based on native species. This can favour the recovery process and the functionality of the ecosystem. Consequently, both the riparian and instream habitat complexity may increase, which will favour the diversity of riparian and aquatic habitats and, therefore, the diversity of instream and riparian species (Hafs *et al.*, 2014). As river restoration or rehabilitation should focus on riverine morphology, it is particularly important to consider their specific hydromorphological characteristics when designing the restoration plan. Indeed, Wyzga (2007) described some strategies for river restoration for reaches affected by instream gravel mining, which included the free formation of wood dams from fallen trees, or the free channel migration in erodible river corridors. Also, successful restoration plans in rivers affected by instream gravel mining included actions as, for instance, adjusting river slope and avoiding river steps, among others in the Johnsbach river in Austria (Rascher *et al.*, 2018), or modifying the geometry of the channel (i.e. widening and shallowing) in the Drac River in France (Brousse *et al.*, 2021). It is important to mention that the final result of the restoration action will depend on the hydrology and flood regime of the river. In any case, the information on the bedload sediment transport, channel geometry and hydraulics is essential to carry out successful restoration actions. In the case of Chile, this requires a profound effort to gather information and to characterise and classify Chilean rivers according to their physical characteristics. A decade ago, Andreoli *et al.* (2012) pointed out the need of a hydromorphological approach and the establishment of geomorphological standards for the management of Chilean rivers, since they are a main element for the assessment of their ecological state; i.e., sedimentary dynamic rivers usually have healthier aquatic and riparian ecosystems. Despite the warning of Andreoli *et al.* (2012), hydromorphological studies are mostly limited to research endeavour in Chile (e.g., Alcayaga *et al.*, 2019; Elgueta *et al.*, 2019; Ulloa *et al.*, 2020). However, the importance of maintaining and promoting the good

ecological status of rivers has been gaining importance in recent years, especially in society and among environmental researchers.

The planning of the human activities that take place in a territory is key to preventing the magnification of their impacts. River basin management plans are part of land-use planning, and analyse the area, identify its potentialities, pressures, and limitations, assess the interactions and/or potential conflict between activities, among others. Moreover, environmental protection and sustainability is gaining relevance in the land-use planning and could be a good opportunity to incorporate this perspective to the basin management plans. This would require a clear and organised institutional structure, with less institutions and no overlapping between the ones that have some legal authority over river resources, i.e. not reproducing the current inefficient model that is established for water resources management, where several institutions have some kind of jurisdiction over water resources, with a lack of coordination between them (Rivera, 2021). Another issue that should be addressed is the consideration of river sediments as an essential part of the river, with relevant ecological implications since they are the support of the processes that take place in the ecosystem. To the knowledge of the authors, to date little or no attention is currently paid to these sediments, which may complicate the holistic consideration of the basin. Given that every river is unique and has its own characteristics and pressures, specific management plans for each individual basin could facilitate both the evaluation of instream mining projects and evaluate their viability according to the inherent characteristics of the river and the other anthropic activities in the territory.

6. Final remarks

In the recent years, there has been a growing interest on the preservation of natural ecosystems in Chile. However, fluvial systems have been widely degraded due to human activities for decades. Among them, instream sed-

iment mining is one of the most detrimental activities in river systems and, although some countries have banned instream mining activities, Chile still has a high number of active instream mining sites, some of which are very large, i.e. affecting tens of kilometres and lasting for several years. This study mapped the instream sediment mining in Chile according to the SEA database. This database includes the projects that planned to extract large volumes of aggregates from the river and required an environmental evaluation, so it does not reflect the actual number of river mining sites, as only some extractions (based on the extracted volume of aggregates) must require this evaluation. According to the database, the central regions (i.e., Ñuble, Libertador Bernardo O'Higgins, Araucanía and Biobío regions) concentrate most of the projects in the country, a fact that could be expected according to river characteristics, such as their dimensions and gravel availability, and since most of the population concentrates in the urban areas of these regions.

Although regulation has been one of the most effective mechanisms for protecting the environment and its resources in many countries around the world, Chilean legislation is still working to achieve this. In fact, given the critical situation of Chilean rivers, this matter has recently been brought up for debate in the Chilean Senate. Lately, public awareness of river sediment mining activities has increased significantly, as evidenced by the number of articles and news stories published in the national press and blogs.

Acknowledgements

This work was supported by ANID *Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo* from Chile with the projects FONDECYT 11201192 and FONDECYT 11190436.

References

Alcayaga, H., Palma, S., Caamaño, D., Mao, L., Soto-Alvarez, M. (2019). Detecting and

quantifying hydromorphology changes in a Chilean river after 50 years of dam operation. *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 252-266. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.04.018>

Alvarez Mardones, G.V. (2019). *In-stream mining: supporting and undermining critical infrastructure*. Master Thesis. Universidad de Concepción, Concepción, Chile. URL: <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/1124>.

Andreoli, A., Mao, L., Iroumé, A., Arumi, J.L., Nardini, A., Pizarro, R., Caamaño, D., Meier, C., Link, O. (2012). The need for a hydromorphological approach to Chilean river management. *Revista Chilena de Historia Natural*, 85, 339-343. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2012000300008>

Arróspide, F., Mao, L., Escauriaza, C. (2018). Morphological evolution of the Maipo River in central Chile: influence of instream gravel mining. *Geomorphology*, 306, 182-197. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.019>

Asabonga, M., Cecilia, B., Mpundu, M.C., Vincent, N.M.D. (2017). The physical and environmental impacts of sand mining. *Transactions of the Royal Society of South Africa*, 721, 1-5. <https://doi.org/10.1080/0035919X.2016.1209701>

Bañales-Seguel, C., Salazar, A., Mao, L. (2020). Hydro-morphological characteristics and recent changes of a nearly pristine river system in Chilean Patagonia: The Exploradores river network. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102444. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102444>

Batalla, R.J. (2003). Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain. *Cuaternario y Geomorfología*, 17, 79-91.

Bendixen, M., Iversen, L.L., Best, J., Franks, D.M., Hackeney, C.R., Latrubesse, E.M., Tusting, L.S. (2021). Sand, gravel, and UN Sustainable Development Goals: conflicts, synergies, and pathways forward. *One Earth*, 4(8), 1095-1111. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.07.008>

Béjar, M., Gibbins, C.N., Vericat, D., Batalla, R.J. (2017). Effects of suspended sediment transport on invertebrate drift. *River Research and Applications*, 33, 1655-1666. <https://doi.org/10.1002/rra.3146>

Bermúdez Soto, J. (2007). *Fundamentos de derecho ambiental*. Ediciones Universitarias de Valparaíso, Valparaíso, 549 pp.

Booth, D.B., Ross-Smith, K., Haddon, E.K., Dunne, T., Larsen, E.W., Roche, J.W., Stock, G.M., Ma-

- hacek, V. (2020). Opportunities and challenges for restoration of the Merced River through Yosemite Valley, Yosemite National Park, USA. *River Research and Applications*, 36, 1803-1816. <https://doi.org/10.1002/rra.3704>
- Brestolani, F., Solari, L., Rinaldi, M., Lollino, G. (2014). On the morphological impacts of gravel mining: The case of the Orco River. *Engineering Geology for Society and Territory*, 3, 319-322. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_66
- Brown, A.V., Lyttle, M.M., Brown, K.B. (1998). Impacts of gravel mining on gravel bed streams. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2, 171-174. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1998\)127<0979:IOG-MOG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1998)127<0979:IOG-MOG>2.0.CO;2)
- Brousse, G., Liébault, F., Arnaud-Fassetta, G., Breilh, B., Tacon, S. (2021). Gravel replenishment and active-channel widening for braided-river restoration: The case of the Upper Drac River (France). *Science of the Total Environment*, 766, 142517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142517>
- Cai, X., Ringler, C., Rosegrant, M. W. (2006). *Modelling water resources management at the basin level: Methodology and application to the Maipo River Basin*. International Food Policy Research Institute, Research Report 149, Washington D.C.
- Carling, P.A. (1984). Deposition of fine and coarse sand in an open-work gravel bed. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41, 263-270. <https://doi.org/10.1139/f84-030>
- Carrillo, R., Mao, L. (2020). Coupling Sediment Transport Dynamics with Sediment and Discharge Sources in a Glacial Andean Basin. *Water*, 12, 3452. <https://doi.org/10.3390/w12123452>
- CCChC - Cámara Chilena de la Construcción (2022). *Proyecto de ley que regula la extracción de áridos*. Comisión de Obras Públicas del Senado, Boletín Nº 15.096-09.
- Cendrero, A., Remondo, J., Beylich, A.A., Cienciana, P., Forte, L.M., Golosov, V.N., Gusarov, A.V., Kijowska-Strugala, M., Laute, K., Li, D., Navas, A., Soldati, M., Vergari, F., Zwolinski, Z., Dixon, J.C., Knigh, J., Nadal-Romero, E., Placzowska, E. (2022). Denudation and geomorphic change in the Anthropocene, a global overview. *Earth-Science Reviews*, 233, 104186. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104186>
- Cerda, R., Vergara, R. (2008). Government subsidies and presidential election outcomes: evidence for a developing country. *World Development* 3611, 2470-2488. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2007.10.019>
- Chen, W, Zhang, S., Li, R., Shahabi, H. (2018). Performance evaluation of the GIS-based data mining techniques of best-first decision tree, random forest, and naïve Bayes tree for landslide susceptibility modelling. *Science of the Total Environment*, 644, 1006-1018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.389>
- Dunne, T., Dietrich, W.E., Humphrey, N.F., Tubbs D.W. (1981). Geologic and geomorphic implications for gravel supply. In: *Proceedings of the Conference on Salmon-Spawning Gravel: A Renewable Resource in the Pacific Northwest?* Washington Water Resource Center, Pullman, 75-100.
- Elgueta, A., Thoms, M.C., Górski, K., Díaz, G., Habit, E.M. (2019). Functional process zones and their fish communities in temperate Andean river networks. *River Research and Applications*, 3510, 1702-1711. <https://doi.org/10.1002/rra.3557>
- Figueroa, R. (2000). Régimen legal de la extracción de áridos. *Revista de Derecho Administrativo Económico*, 22, 357-383. <https://doi.org/10.7764/redae.4.6>
- Gavriletea, M.G. (2017). Environmental impacts of sand exploitation. Analysis of sand market. *Sustainability*, 9, 1118. <https://doi.org/10.3390/su9071118>
- Habit, E., Zurita, A., Díaz, G., Manosalva, A., Arriagada, P., Link, O., Górski, K. (2022). Latitudinal and Altitudinal Gradients of Riverine Landscapes in Andean Rivers. *Water*, 1417, 2614. <https://doi.org/10.3390/w14172614>
- Hafs, A.W., Harrison, L.R., Utz, R.M., Dunne, T. (2014). Quantifying the role of woody debris in providing bioenergetically favorable habitat for juvenile salmon. *Ecological Modelling*, 285, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.04.015>
- Hajdukiewicz, H., Wyżga, B. (2018). Aerial photo-based analysis of the hydromorphological changes of a mountain river over the last six decades: The Czarny Dunajec, Polish Carpathians. *Science of the Total Environment*, 648, 1598-1613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.234>
- Hayer, C.A., Irwin, E.R. (2008). Influence of gravel mining and other factors on detection probabilities of Coastal plain fishes in the Mobile River Basin, Alabama. *Transactions of the American Fisheries Society*, 137(6), 1606-1620. <https://doi.org/10.1577/T07-153.1>

- Instituto Nacional de Estadística, INE (2018). *Síntesis de resultados de CENSO 2017*. Chile.
- Kiss, T., Nagy, Z. and Balogh, M. (2017). Floodplain level development induced by human activity-case study in the Lower Maros/Mureş River, Romania and Hungary. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 121, 83-93.
- Kondolf, G.M. (1994a). Environmental planning in regulation and management of instream gravel mining in California. *Landscape and Urban Planning*, 29, 185-199. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)90027-2)
- Kondolf, G.M. (1994b). Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, 28, 225-243. [https://doi.org/10.1016/0169-2046\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0169-2046(94)90010-8)
- Kondolf, G.M. (1997). Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 214, 533-551. <https://doi.org/10.1007/s002679900048>
- Kondolf, G.M., Smeltzer, M., Kimball, L. (2001). *Freshwater gravel mining and dredging issues*. White Paper, Centre for Environmental Design Research, 130 pp.
- Mao, L. (2023). The geomorphological and ecological functioning of the Silala River. *WIREs Water*, e1691. <https://doi.org/10.1002/wat2.1691>
- Martín-Vide, J.P., Plana-Casado, A., Sambola, A., Capapé, S. (2015). Bedload transport in a river confluence. *Geomorphology*, 250, 15-28. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.050>
- Ministry of Environment, MMA (2022). *Sistema de evaluación de impacto ambiental*. URL: <https://seia.sea.gob.cl/busqueda/buscar-ProyectoAction.php?nombre=extraccion> Accessed: August 1, 2022.
- Ministry of Housing and Urban Planning - Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2021). *Dinámica de Crecimiento Urbano de las Ciudades Chilenas*. Centro de Estudios de Ciudad y Territorio.
- Mori, N., Brancelj, A. (2011.) Invertebrate drift during instream gravel extraction in the River Bača, Slovenia. *Fundamental and Applied Limnology*, 1782, 121-130. <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2011/0178-0121>
- Mori, N., Simčič, T., Lukančič, Brancelj, A. (2011). The effect of instream gravel extraction in a pre-alpine gravel-bed river on hyporheic invertebrate community. *Hydrobiologia*, 667, 15-30. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0648-x>
- Muñoz, E.E., Nuñez, F., Mohammadi, J. (2009). Investigation of Common Causes of Bridge Collapse in Colombia. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 144, 194-200. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000006)
- Orrego, K., Harris, P., Cavada, J.P. (2016). *Regulación jurídica de la extracción de áridos*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones.
- Owens, P.N. (2020). Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: a review of human impacts during a period of rapid global environmental change. *Advances in Sediment Science and Management*, 20, 4115-4143. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02815-9>
- Pacheco, F., Rojas, O., Hernández, E., Caamaño, D. (2022). Effects on Fluvial Geomorphology and Vegetation Cover following Hydroelectric Power Plant Operation: A Case Study in the Maule River Chile. *Water*, 14(11), 1673. <https://doi.org/10.3390/w14111673>
- Pham Van, C., Chua, V. (2020). Numerical simulation of hydrodynamic characteristics and bedload transport in cross sections of two gravel-bed rivers based on one-dimensional lateral distribution method. *International Journal of Sediment Research*, 35, 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.12.001>
- Rascher, E., Rindler, R., Habersack, H., Sass, O. (2018). Impacts of gravel mining and renaturation measures on the sediment flux and budget in an alpine catchment (Johnsbach Valley, Austria). *Geomorphology*, 318, 404-420. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.009>
- Rempel, L.L., Church, M. (2009). Physical and ecological response to disturbance by gravel mining in a large alluvial river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 66, 52-71. <https://doi.org/10.1139/F08-184>
- Rinaldi, M., Wyzga, B., Surian, N. (2005). Sediment mining in alluvial channels: physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 217, 805-828. <https://doi.org/10.1002/rra.884>
- Rivera, D. (2021). El laberinto institucional del agua. *Revista Universitaria UC*, 164. <https://revistauniversitaria.uc.cl/dossier/el-laberinto-institucional-del-agua/13825/>
- Roberge, M. (2002). Human modification of the geomorphologically unstable salt river in Metropolitan Phoenix. *The Professional Geographer*, 542, 175-189. <https://doi.org/10.1111/0033-0124.00324>

- Romero, F.I., Cozano, M.A., Gangas, R.A., Naulin, P.I. (2014). Zonas ribereñas: protección, restauración y contexto legal en Chile. *Bosque*, 35(1), 3-12. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000100001>
- Sear, D.A., Archer, D. (1998). Effects of gravel extraction on stability of gravel-bed rivers: the Wooler Water, Northumberland, UK. In: *Gravel-bed Rivers in the Environment* (Klingeman, P.C., Beschta, R.L., Komar, P.D., Bradley, J.B.; Eds). Water Resources Publications, LLC: Highlands Ranch, CO, USA, 415-432.
- Simanjuntak, C., Gaiser, T., Ahrends, H. E., Ceglar, A., Singh, M., Ewert, F., Srivastava, A. K. (2023). Impact of climate extreme events and their causality on maize yield in South Africa. *Nature*, 13, 12462. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38921-0>
- Syvitski, J., Restrepo Ángel, J., Saito, Y., Overeem, I., Vörösmarty, C.J., Wang, H., Olago, D. (2022). Earth's sediment cycle during the Anthropocene. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 179-196. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00253-w>
- Ulloa, H., Iroumé, A., Picco, L., Vergara, G., Sitia, T., Mao, L., Mazzorana, B. (2020). Do the morphological characteristics of Chilean gravel-bed rivers exhibit latitudinal patterns? *Journal of South American Earth Sciences*, 99, 102522. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102522>
- United Nations Environment Programme - UNEP. (2014). *Sand, rarer than one thinks*. URL: http://www.unep.org/pdf/UNEP_GEAS_March_2014.pdf Accessed: August 3, 2022.
- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J.B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519, 2538-2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>
- Villablanca, M.L., Piqué, G., Iroumé, A., Mazzorana, B., Batalla, R.J. (2023). Rivers in Contrasted climates React Differently to Dams: Geomorphological evidence from Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 131, 104625. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104625>
- Wyźga, B. (2001). A geomorphologist's criticism of the engineering approach to channelization of gravel-bed rivers: case study of the Raba River, Polish Carpathians. *Environmental Management*, 28(3), 341-358. <https://doi.org/10.1007/s0026702454>
- Wyźga, B. (2007). A review on channel incision in the Polish Carpatian rivers during the 20th century. In: Habersack, H., Piégay, H., Rinaldi, M. (Eds.). *Gravel-bed rivers VI: From process understanding to river restoration*. Developments in Earth Surface Processes, 817 pp. [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(07\)11142-1](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(07)11142-1)

Recibido el 29 de julio de 2024

Aceptado el 1 de diciembre de 2024

Supplementary material

Examples of TV and newspaper news reflecting the society awareness of illegal instream aggregate mining and the associated impacts.

- a) Channel T13: The municipalities of Quilpué and Viña del Mar reported illegal aggregate mining in Marga Marga stream on 04th September 2018. [<https://www.youtube.com/watch?v=mpPntf8BUGo>]



- b) Hola Chile: On 24th May 2019, the Minister of National Assets of Chile, Felipe Ward Edwards informed of about 1000 ha of illegal aggregate mining in Chile, mainly in Metropolitan and Antofagasta regions. [<https://www.youtube.com/watch?v=0F6At6sLxsw>]



- c) Channel T13: On 15th May 2019, T13 channel reported illegal extraction of sand in Metropolitan Region. [<https://www.t13.cl/videos/nacional/video-reportaje-t13-aridos-ilegales-peligro-rio>]



Áridos ilegales: peligro en el río - #ReportajesT13

YouTube | T13 | 1,2K visualizaciones | 15 de may. de 2019

- d) TVN (Televisión Nacional de Chile): On 11th October 2019, the 24 Horas TVN Chile reported illegal aggregates extraction in Putú, Maule Region. [<https://www.youtube.com/watch?v=tC8E6zc5j0c>]



Gobierno se desmarca de la extracción ilegal de áridos en Putú | 24 Horas TVN Chile

24 24 Horas - TVN Chile
1,81 M de suscriptores

Subscribirse



1



Partilhar



Transferir



284 visualizações 11/10/2019

La empresa contratada por el Gobierno tiene una serie de proyectos viales programados en la región del Maule. Por otra parte aún no se sabe si fue esta la primera y única vez que se extrajeron áridos del santuario o han habido más extracciones en otras oportunidades.

- e) Biobío Chile: The BioBío Radio reported, on 10th September 2024, an illegal aggregates extraction taking place during two decades from the Biobío River in Hualpén. [https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2024/09/10/tridente-la-empresa-que-extrae-aridos-en-hualpen-y-que-funciona-sin-permisos-hace-casi-20-anos.shtml]

The screenshot shows the website biobiochile.cl with a navigation bar including categories like PODCASTS, NACIONAL, INTERNACIONAL, ECONOMÍA, DEPORTES, TENDENCIAS, OPINIÓN, and BBCL INVESTIGA. A search bar and a 'bbcl en 5'' button are also visible. The main content area features a blue sidebar for 'Comunidad Bio Bio' with the text 'Únete y sé parte de la Comunidad Bio Bio' and four cartoon avatars. The main article is titled 'Tridente: la empresa que extrae áridos en Hualpén y que funciona sin permisos hace casi 20 años'. It is published by Manuel Cabrera, with information from Tatiana Risso, and dated 'Martes 10 septiembre de 2024 | 13:51'. The article includes a 'Leer más tarde' button and a video player showing an aerial view of a river with a dam. A banner at the top of the article area says 'AVISOS LEGALES Simple, fácil y económico' with a scale of justice icon and a smartphone image. Social media icons for Facebook, Twitter, WhatsApp, and a link icon are present, along with a 'Suscríbete a nuestros Newsletters' button.

- f) Biobío Chile: The Biobío Radio in 10th October 2024 reported illegal aggregates extraction from Biobío River. [https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/region-del-bio-bio/2024/10/10/concepcion-denuncian-extraccion-ilegal-de-aridos-del-rio-bio-bio-en-construccion-de-puente-industrial.shtml]

The screenshot shows the website biobiochile.cl with a navigation bar similar to the previous one. The main content area features the same blue sidebar for 'Comunidad Bio Bio'. The main article is titled 'Concepción: denuncian extracción ilegal de áridos del río Bío Bío en construcción de Puente Industrial'. It is published by Daniela Salgado, with information from Tatiana Risso, and dated 'Jueves 10 octubre de 2024 | 16:19'. The article includes a 'Leer más tarde' button and a video player showing a construction site on a riverbank. A banner at the top of the article area says 'AVISOS LEGALES Ingresar y publica en línea' with a scale of justice icon and a smartphone image. Social media icons for Facebook, Twitter, WhatsApp, and a link icon are present, along with a 'Suscríbete a nuestros Newsletters' button.

- g) País Lobo: País Lobo reported, on 14th November 2024, an illegal extraction of aggregates in Osorno, Los Lagos Region. [<https://www.paislobo.cl/2024/11/detectan-extraccion-ilegal-de-aridos-en-osorno-infractor-citado-tribunal.html#:~:text=En%20un%20patrullaje%20preventivo%20realizado,Ordenanza%20Municipal%20127%2C%20la%20cual>]

The screenshot shows the Paislobo.cl website header with navigation links: Nacional, Comunas, Policial, Deportes, Entrevistas, Política, and Podc. Below the header is a red banner for 'Inacap SEDE OSORNO ADMISIÓN 2025' and 'MATRÍCULA GRATIS HASTA EL 31 DE DICIEMBRE'. The breadcrumb trail reads: Home > Comunas > Medio Ambiente > Osorno. The main headline is 'Detectan extracción ilegal de áridos en Osorno: infractor citado a tribunal'. The article is dated '14 nov, 2024' and includes social media sharing icons for Facebook, Twitter, Pinterest, LinkedIn, Tumblr, WhatsApp, and Telegram.

- h) Rengo en la Noticia Media: Rengo en la Noticia Media reported, on 2nd November 2023, that the Court ordered for stopping illegal aggregates extraction from Cachapoal River. [<https://www.rengoenlanoticia.cl/not/2023/11/02/corte-de-rancagua-ordena-paralizar-extraccion-de-aridos-de-rio-cachapoal-y-envia-antecedentes-al-ministerio-publico/>]

The screenshot shows the Rengo en la Noticia Media website header with navigation links: INICIO, COMUNAL, NACIONAL, POLICIAL, POLÍTICA, REGIONAL, CONVIVENCIA, and OPINIÓN. The main image is a photograph of a palm tree against a blue sky. The breadcrumb trail reads: Inicio > Policial > Corte de Rancagua ordena paralizar extracción de áridos de río Cachapoal y... The article title is 'Corte de Rancagua ordena paralizar extracción de áridos de río Cachapoal y envía antecedentes al Ministerio Público'. The article is dated '2 noviembre, 2023' and has 1615 views and 0 comments.

