

## DESARROLLO Y APLICACIÓN EN ESPAÑA DE LA TÉCNICA DE TRAZADO DE SEDIMENTO EN CUENCAS DE DRENAJE, *SEDIMENT FINGERPRINTING*

JULIÁN GARCÍA-COMENDADOR ([id](#))<sup>1</sup>  
NÚRIA MARTÍNEZ-CARRERAS ([id](#))<sup>2</sup>  
JAUME COMPANY ([id](#))<sup>2</sup>  
JOSEP FORTESA ([id](#))<sup>2</sup>  
MAURICI RUIZ ([id](#))<sup>2,3</sup>  
JOAN ESTRANY ([id](#))<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Mediterranean Ecogeomorphological and Hydrological Connectivity Research Team -MEDhyCON. Departament de Geografia, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa km 7,5, 07122 Palma, Illes Balears, España.*

<sup>2</sup>*Catchment and Eco-Hydrology Research Group (CAT), Environmental Research and Innovation Department (ERIN), Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), 41, Rue du Brill, L-4422, Belvaux, Luxembourg.*

<sup>3</sup>*Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció, Universitat de les Illes Balears, Carretera de Valldemossa km 7,5, 07122 Palma, Illes Balears, España.*

Autor de correspondencia: [julian.garcia@uib.es](mailto:julian.garcia@uib.es)

**Resumen.** La técnica *sediment fingerprinting* es una metodología fundamental para trazar sedimento a escala de cuenca de drenaje. Se basa en la comparación de diferentes propiedades del suelo entre muestras recolectadas en áreas de erosión potencial y muestras de sedimento fluvial. Este estudio pretende realizar una revisión de la literatura publicada en revistas de impacto por autores con afiliación española, con el objetivo de determinar el papel de los investigadores afiliados en España en el desarrollo y optimización de la técnica. Se realizó un análisis bibliométrico utilizando *Scopus* y *Google Scholar*, recabándose un total de 31 artículos. Se observó una tendencia al alza en las publicaciones durante el periodo 2010-2022, con un promedio anual de  $2.3 \pm 1.4$  artículos. Los estudios se centran, principalmente en Aragón, Luxemburgo e Islas Baleares, enfocándose no solamente en su vertiente puramente geomorfológica, sino también en la mejora de la técnica mediante la aplicación de trazadores novedosos o nuevas metodologías estadísticas. Las publicaciones analizadas muestran que la técnica *sediment fingerprinting* está implantada en la comunidad científica española con publicaciones relevantes en el ámbito científico internacional.

**Palabras clave:** *sediment fingerprinting*, trazado de sedimento, fuentes de sedimento, afiliación española

### DEVELOPMENT AND APPLICATION IN SPAIN OF THE SEDIMENT TRACING TECHNIQUE IN DRAINAGE CATCHMENTS, SEDIMENT FINGERPRINTING

**Abstract.** The sediment fingerprinting technique is a fundamental methodology for sediment tracing at catchment scale. The technique is based on the comparison of different soil properties between samples collected in potential erosion areas and fluvial sediment samples. This study aims to review the literature published in impact journals by authors with Spanish affiliation, with the objective of determining the role of Spanish-affiliated researchers in the development and optimisation of the technique. A bibliometric analysis was performed using *Scopus* and *Google Scholar*, accounting a total of 31 published papers. An upward trend in publications was observed during the 2010-2022 period, with an annual average of  $2.3 \pm 1.4$  papers. The studies are mainly focused in Aragon, Luxembourg and the Balearic Islands, aiming not only on the purely geomorphological aspect, but also on the technique improvement through the application of novel tracers or new statistical

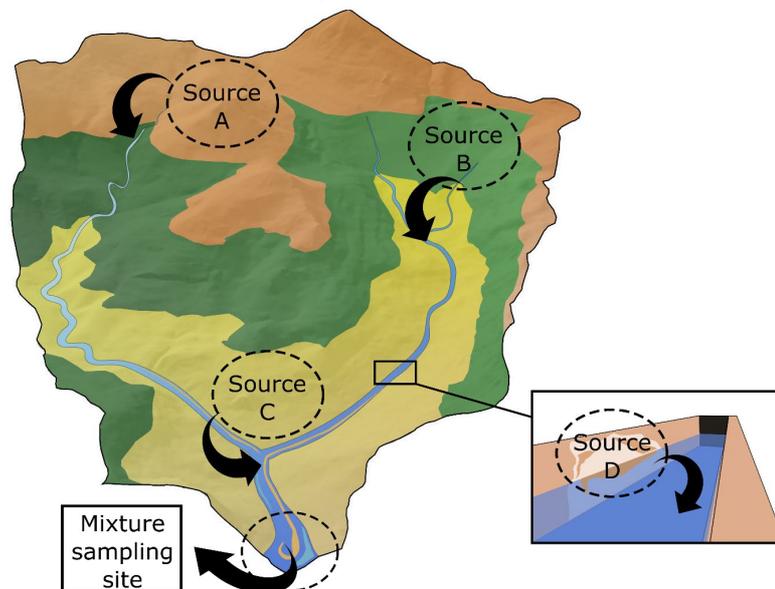
methodologies. The analysed publications showed that the sediment fingerprinting technique is well established in the Spanish scientific community, with relevant international publications on the subject.

**Keywords:** sediment fingerprinting, sediment tracing, sediment sources, Spanish affiliation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La erosión es un proceso natural que comprende la meteorización, transporte y deposición de partículas del suelo impulsadas por una fuerza específica. A pesar de que es un proceso esencial dentro de los ciclos geoquímicos terrestres, puede generar una serie de efectos negativos relacionados con la degradación de la calidad de ecosistemas terrestres y acuáticos (Pimentel and Kounang, 1998). Las predicciones climáticas actuales indican una evolución del ciclo hidrológico que puede favorecer un incremento de los procesos globales de erosión hídrica alrededor del 30 al 66% en los próximos 50 años (Borrelli et al., 2020). Estas tendencias de los sistemas terrestres señalan la erosión y procesos asociados, como el transporte de sedimento en suspensión, como un grave problema ambiental y de salud humana en todo el mundo.

Figura 1. Modelo conceptual simplificado de la técnica de identificación de fuentes de sedimentos basado en 3 fuentes superficiales diferentes (A, B y C; por ejemplo, usos del suelo, litología) y una fuente subsuperficial (D; margen de canal).



Fuente: (García-Comendador, 2021)

Una de las técnicas de mayor relevancia a nivel internacional para la detección de fuentes de sedimento en cuencas de drenaje es la llamada *sediment fingerprinting technique* o *sediment source fingerprinting* (cf. Collins et al., 2020; Owens et al., 2016; Walling, 2013). La técnica, desarrollada inicialmente en década de 1970 del s. XX (Klages and Hsieh, 1975; Wall and Wilding, 1976; Walling et al., 1979), consiste principalmente en la comparación entre parámetros de suelo definitorios de las zonas de erosión potencial y parámetros del sedimento. En un esquema idealizado de los procesos de transporte del sedimento (Figura 1) (i) las partículas del suelo en zonas de erosión se desprenden y transportan durante los episodios de precipitación, (ii) las partículas de las diferentes fuentes de sedimento erosionadas se mezclan durante el transporte, (iii) la mezcla resultante es transportada por la red de drenaje en forma de carga de sedimento, (iv) las propiedades del suelo utilizadas como trazadores del sedimento reflejan las variaciones espacio-temporales de las contribuciones de sedimento de las áreas fuente y, finalmente, (v) los trazadores de la fuente de origen y de los sedimentos se pueden comparar, permitiendo estimar cuantitativamente las fuentes predominantes de sedimento y su relevancia relativa. Esta es la premisa básica sobre la que se sustenta el trazado de sedimento y la determinación de su origen a escala cuenca de drenaje y, por tanto,

la técnica *sediment fingerprinting*. Para su aplicación, es imprescindible que las propiedades utilizadas para trazar el sedimento sean representativas de las diferentes fuentes de sedimento consideradas, sean medibles y se mantengan relativamente estables durante los procesos de transporte, mezcla y deposición. Con respecto a las propiedades del suelo utilizadas como trazadores, estas se pueden clasificar en tres categorías diferenciadas: (i) trazadores geoquímicos, como magnetismo mineral, radioisótopos o elementos inorgánicos; (ii) trazadores bioquímicos como biomarcadores, *environmental DNA* y otros elementos orgánicos; y (iii) físicos, como parámetros espectro-métricos, color, distribución del tamaño de partícula, etc.

Esta comunicación pretende hacer una sucinta revisión de la aplicación y optimización de la técnica *sediment fingerprinting* para detección del origen del sedimento a escala de cuenca de drenaje en el ámbito español, por lo tanto, centrándose en publicaciones relevantes que cuenten con por lo menos una afiliación española.

## 2. METODOLOGÍA

La base de datos bibliográfica seleccionada para realizar el análisis fue [Scopus](#) (Elsevier B.V., 2023), de gran versatilidad y opciones de selección. Se realizaron 3 búsquedas utilizando palabras claves específicas o conjuntos de palabras que pudieran aislar los artículos centrados en la determinación del origen del sedimento a escala cuenca de drenaje o la optimización de la técnica *sediment fingerprinting*, y que, a su vez, excluyeran otro tipo de análisis realizados con trazadores del sedimento, como tasas de erosión o de redistribución del suelo. Para la búsqueda en *Scopus*, se utilizaron tanto términos individuales (unidos por un “and” en el motor de búsqueda), como combinaciones de palabras con coincidencia exacta, utilizando para ello el entrecomillado (ej. “*sediment fingerprinting*”). Por lo tanto, con la casilla de *search within* marcada en *article title*, *abstract*, *keywords*, las palabras clave utilizadas en cada una de las búsquedas fueron (i) “Sediment fingerprinting”, sediment and sources and sediment and origin; (ii) “Sediment fingerprinting”, y, (iii) “fingerprinting technique and sediment”. Cabe destacar que en todos los casos se activó el filtro “Spain” en la casilla “Country/territory” para que aparecieran solamente artículos con al menos una afiliación a alguna institución española.

Posteriormente se realizó un proceso de filtrado manual para revisar y aislar solamente los artículos relacionados con la determinación del origen del sedimento en cuencas de drenaje y la optimización de las metodologías relacionadas directamente con la técnica. Finalmente se revisaron los perfiles de *Google Scholar* de los autores para incluir cualquier artículo de la temática que no hubiera sido detectado en las búsquedas automáticas en *Scopus*.

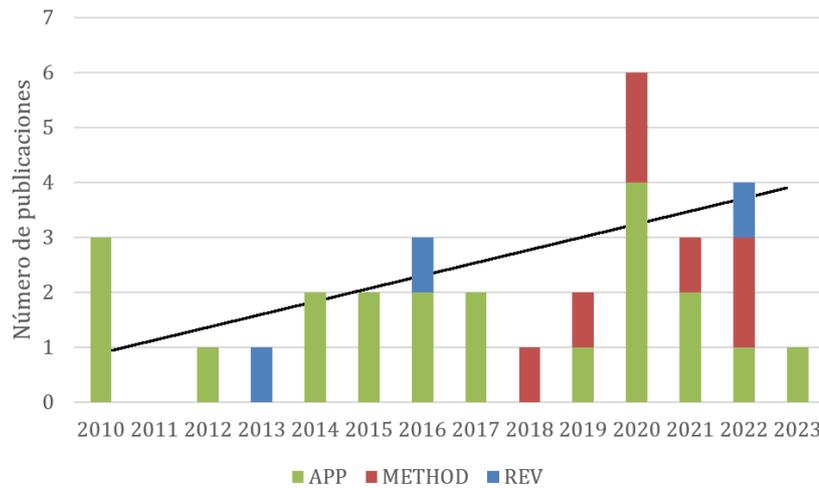
El análisis de los artículos se centró, principalmente, en una descripción del número de publicaciones anuales y su tendencia, tipología de los artículos, autoría y agrupaciones de coautoría y áreas de estudio. Para las agrupaciones de coautoría se utilizó la herramienta *VOSviewer*, versión 1.6.19 (van Eck N. J.; Waltman, 2010), apareciendo solamente los autores con tres o más artículos, para una mejor legibilidad de los datos.

## 3. RESULTADOS

Los resultados de las tres búsquedas en *Scopus* fueron (i) 29 resultados con las palabras clave “Sediment fingerprinting” sediment and sources and sediment and origin; 21 resultados con (ii) “Sediment fingerprinting”; y 42 con (iii) fingerprinting technique and sediment. Tras el filtrado manual y revisión de las publicaciones de los autores, se discriminaron un total de 31 publicaciones relacionadas directamente con el tema, 27 de las cuales el primer autor contaba con afiliación española.

El primer año en el que se pueden encontrar artículos con afiliación española es 2010. Se trata de 3 artículos desarrollados por N. Martínez-Carreras como primera autora (Martínez-Carreras *et al.*, 2010a, 2010b, 2010c). Durante el resto de años del periodo de estudio, se observa una tendencia en aumento del número de publicaciones (Figura 2), con una media de  $2.3 \pm 1.4$  anuales, siendo el año 2020 y 2022, con cinco y cuatro publicaciones respectivamente, los años de mayor producción.

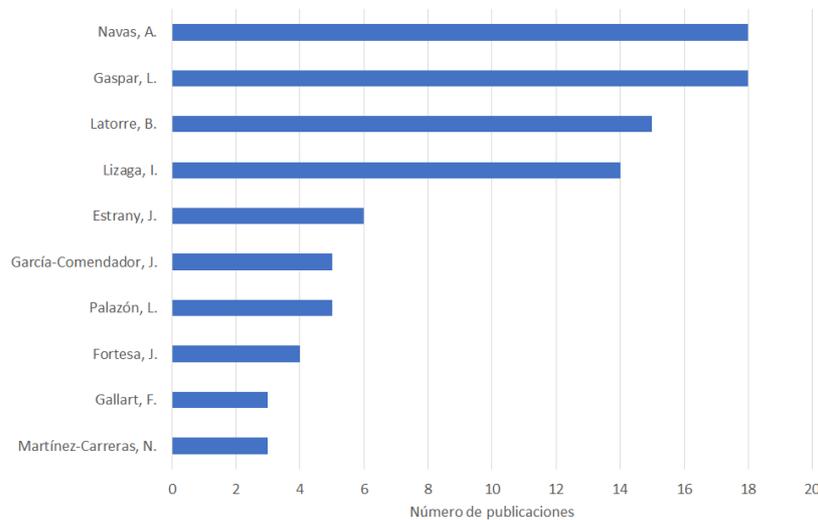
Figura 2. Número de publicaciones relacionadas con la técnica sediment fingerprinting por año, tipo y tendencia\* (línea negra).



\*La línea de tendencia excluye el año 2023 por no haber culminado en el momento en el que se realizó el estudio.

Por número de artículos, los autores más prolíficos fueron A. Navas, (Figura 3) y L. Gaspar con 18 publicaciones cada una, seguidas por B. Latorre (15) e I. Lizaga (14), todos ellos con afiliación en Estación Experimental Aula Dei - CSIC. Analizando las publicaciones por afiliación española destaca CSIC – Estación Experimental Aula Dei (EEAD) con 19 artículos, seguido por la Universitat de les Illes Balears, con 6 y el Instituto de Diagnostico Ambiental y Estudios del Agua - CSIC (IDAEA) con 3.

Figura 3. (A) Número de publicaciones por autor; (B) número de publicaciones por afiliación española.



En cuanto a tipología de artículo, podemos encontrar tres categorías generales diferentes (Tabla 1 y Figura 1), (i) revisión del estado de la cuestión (REV) con tres publicaciones (e.i. Evrard *et al.*, 2022; Guzmán *et al.*, 2013; Owens *et al.*, 2016); (ii) desarrollo de metodologías novedosas, pero en los que no se traza el sedimento (METHOD) en ninguna cuenca de drenaje, con ocho publicaciones (Blake *et al.*, 2018; García-Comendador *et al.*, 2023; Gaspar *et al.*, 2022, 2019; Latorre *et al.*, 2021; Lizaga *et al.*, 2022, 2020a, 2020b), dónde se ha trabajado principalmente en la optimización de técnicas estadísticas para la determinación de las contribuciones de cada fuente o en el tratamiento para la selección de los trazadores óptimos para hacer los análisis.; y, finalmente (iii) veinte publicaciones con desarrollo de nuevas metodologías o estudios de caso en los que sí se ha aplicado la técnica de trazado de sedimento sobre un área de estudio específica (APP) (Brosinsky *et al.*, 2014; Estrany *et al.*, 2016, 2012; García-Comendador *et al.*, 2021, 2020, 2017; Lizaga *et al.*, 2021, 2020a, 2019; Martínez-Carreras *et al.*, 2010c, 2010b, 2010a;

Navas *et al.*, 2022, 2020; Palazón *et al.*, 2016, 2015b, 2015a, 2014; Palazón and Navas, 2017), destacándose la aplicación de la técnica en cuencas agroforestales o afectadas por incendios.

En cuanto a áreas de estudio dónde se ha aplicado la técnica, podemos encontrar cuencas de drenaje principalmente en tres regiones (Aragón, Illes Balears y Luxemburgo), sin embargo, también se ha aplicado en otras regiones como Perú (Navas *et al.*, 2022) o Noruega (Navas *et al.*, 2020).

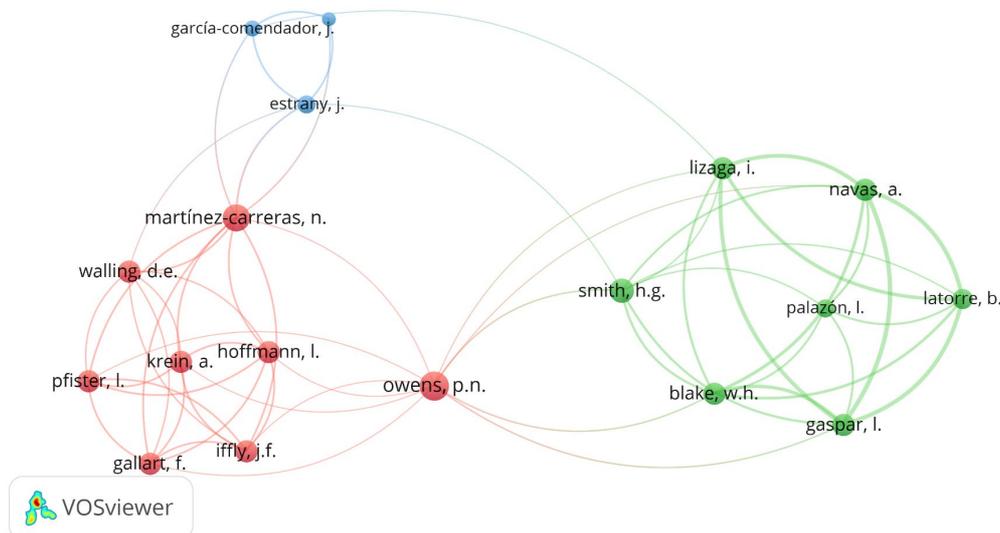
Finalmente, se pueden distinguir tres clústeres de coautoría con afiliación española (Figura 4), (i) en azul, el clúster con afiliación a la Universitat de les Illes Balears; (ii) en verde la agrupación con afiliación principal en la Estación Experimental de Aula Dei; y, finalmente en rojo (iii), el clúster definido por autores afiliados al Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua, en el que se agrupan numerosos autores con afiliaciones no españolas.

Tabla 1. Número de artículos publicados por tipología y referencias

| Tipología | Publicaciones desde 2010* | Referencias  |
|-----------|---------------------------|--|
| REV       | 3                         | Evrard <i>et al.</i> , 2022; Guzmán <i>et al.</i> , 2013; Owens <i>et al.</i> , 2016   |
| METHOD    | 8                         | Blake <i>et al.</i> , 2018; García-Comendador <i>et al.</i> , 2023; Gaspar <i>et al.</i> , 2022, 2019a; Latorre <i>et al.</i> , 2021; Lizaga <i>et al.</i> , 2022, 2020a, 2020c  |
| APP       | 20                        | Brosinsky <i>et al.</i> , 2014; Estrany <i>et al.</i> , 2016, 2012; García-Comendador <i>et al.</i> , 2021, 2020, 2017; Lizaga <i>et al.</i> , 2021, 2020b, 2019; Martínez-Carreras <i>et al.</i> , 2010c, 2010b, 2010a; Navas <i>et al.</i> , 2022, 2020; Palazón <i>et al.</i> , 2016, 2015b, 2015a, 2014; Palazón and Navas, 2017 |

\*El periodo de estudio finalizó el 1 de marzo de 2023.

Figura 4. Clústeres de coautoría realizados a partir de datos de Scopus



En azul el clúster con afiliación a la Universitat de les Illes Balears; en verde la agrupación con afiliación principal en la Estación Experimental de Aula Dei; y, en rojo, el clúster definido por autores afiliados al Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua. Las líneas que unen a los diferentes autores reflejan conexiones entre ellos marcadas por coautoría en artículos.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La tendencia al alza del número de publicaciones específicas sobre la técnica *sediment fingerprinting* con alguna afiliación española, muestra el interés creciente de los científicos españoles en el trazado de sedimento, seguramente reforzado por las previsiones actuales en cuanto a cambio de usos del suelo y

evolución climática y sus consecuencias sobre el incremento de los procesos erosivos y de transporte de sedimento (Borrelli *et al.*, 2020). Esta tendencia al alza coincide con otros análisis del estado de la cuestión realizados a nivel internacional (Collins *et al.*, 2020; Walling, 2013), donde se observa un incremento constante del número de publicaciones referidas a la aplicación o mejora de esta técnica durante las últimas tres décadas, con una media anual de 31 artículos específicos durante el periodo 2013-2019 (Collins *et al.*, 2020), reafirmando así, la técnica como fundamental para los estudios de trazado de sedimento en cuencas de drenaje.

A nivel internacional, según datos de Scopus, la mayoría de los estudios se han realizado en EE. UU., Reino Unido y China, estando España en la octava posición, lo que evidencia interés por su aplicación y desarrollo en nuestro país.

En España se establecen tres agrupaciones basadas en la coautoría (Figura 4), que reflejan claramente las afiliaciones de los principales grupos de investigación que tratan y publican sobre la técnica *sediment fingerprinting*. Estos grupos cuentan con afiliación a la Estación Experimental de Aula Dei - CSIC, situada en Zaragoza, cuya investigación está centrada principalmente en Aragón con 18 publicaciones; seguido por la Universitat de les Illes Balears, situada en Palma y con 6 publicaciones centradas en Mallorca; y, finalmente, el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua - CSIC con tres publicaciones centradas en Luxemburgo, todas firmadas como primera autora por N. Martínez-Carreras, pionera del desarrollo de la técnica en nuestro país (Martínez-Carreras *et al.*, 2010a, 2010b, 2010c).

Las publicaciones con afiliación española no solo se centran en los procesos puramente geomorfológicos, sino que también apuestan por la inclusión de trazadores novedosos como espectrometría de color (e.g. Martínez-Carreras *et al.*, 2010b), introducción de nuevas técnicas estadísticas para la determinación del origen del sedimento (e.g. Lizaga *et al.*, 2020c), técnicas estadísticas para la selección de trazadores (e.g. Latorre *et al.*, 2021), la combinación de la de la técnica *sediment fingerprinting* con otras metodologías (por ejemplo, índices de conectividad del sedimento, monitorización continua de agua y sedimento) (e.g. Estrany *et al.*, 2012; García-Comendador *et al.*, 2021), la experimentación sobre el comportamiento conservador de las propiedades del sedimento durante los procesos de transporte o almacenamiento en el canal (García-Comendador *et al.*, 2023), el uso de muestras artificiales para testear modelos o dar robustez a los resultados de origen del sedimento (e.g. García-Comendador *et al.*, 2020; Martínez-Carreras *et al.*, 2010c) o los efectos del tamaño de partícula (e.g. Gaspar *et al.*, 2022), la simplificación de los procedimientos tanto estadísticos como de reducción de costes y, para fomentar la aplicabilidad de la técnica en los planes de gestión integrados de cuencas de drenaje (e.g. García-Comendador *et al.*, 2021) y la aplicación y desarrollo de la técnica en cuencas afectadas por incendios forestales (e.g. García-Comendador *et al.*, 2020, 2017), habiéndose explorado por primera vez esta cuestión en cuencas mediterráneas en Estrany *et al.* (2016), temática poco tratada a nivel internacional.

Finalmente es necesario remarcar la aparición en 2018 (Figura 2), de publicaciones centradas únicamente en el desarrollo de la técnica, en las que no se aplicaba de manera práctica sobre un área de estudio. Esta proliferación de artículos de esta tipología es una tendencia al alza de manera internacional, generando un debate en torno al cambio de foco por parte de los investigadores, pasando del desarrollo de una herramienta que permitiera responder preguntas de investigación sobre el funcionamiento de los paisajes y proporcionar la sociedad y los gestores medioambientales información necesaria para la toma de decisiones y elaboración de normativas, a simplemente investigaciones centradas en el desarrollo metodológico, las cuales, pese a ser imprescindibles, pueden generar un alejamiento de los objetivos originales, divergencia de enfoques y falta de estandarización de métodos (Owens, 2022). Sin embargo, en el caso de los artículos con afiliaciones españolas se puede observar un balance apropiado entre las publicaciones METHOD y APP, con 7 y 9 artículos respectivamente desde 2018.

El aumento de las publicaciones medias anuales sobre *sediment fingerprinting*, la gran variedad de temáticas tratadas en los artículos analizados, con énfasis siempre en la optimización de la técnica y el avance en temas poco explorados, hacen ver el buen estado del estudio centrado en el trazado de sedimento por autores con afiliación española. Los trabajos analizados, publicados de manera continua y con carácter internacional y de relevancia, muestran que la técnica *sediment fingerprinting* está implantada/consolidada en la comunidad científica española.

## REFERENCIAS

- Blake, W.H., Boeckx, P., Stock, B.C., Smith, H.G., Bodé, S., Upadhayay, H.R., Gaspar, L., Goddard, R., Lennard, A.T., Lizaga, I., Lobb, D.A., Owens, P.N., Petticrew, E.L., Kuzyk, Z.Z.A., Gari, B.D., Munishi, L., Mtei, K., Nebiyu, A., Mabit, L., Navas, A., Semmens, B.X. (2018). A deconvolutional Bayesian mixing model approach for river basin sediment source apportionment. *Sci. Rep.* 8, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30905-9>
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E., Alewell, C., Wuepper, D., Montanarella, L., Ballabio, C. (2020). Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015–2070). *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 117, 21994–22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
- Brosinsky, A., Foerster, S., Segl, K., López-Tarazón, J.A., Piqué, G., Bronstert, A. (2014). Spectral fingerprinting: characterizing suspended sediment sources by the use of VNIR-SWIR spectral information. *J. Soils Sediments* 14, 1965–1981. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0927-z>
- Collins, A.L., Blackwell, M., Boeckx, P., Chivers, C.A., Emelko, M., Evrard, O., Foster, I., Gellis, A., Gholami, H., Granger, S., Harris, P., Horowitz, A.J., Laceby, J.P., Martínez-Carreras, N., Minella, J., Mol, L., Nosrati, K., Pulley, S., Silins, U., da Silva, Y.J., Stone, M., Tiecher, T., Upadhayay, H.R., Zhang, Y. (2020). Sediment source fingerprinting: benchmarking recent outputs, remaining challenges and emerging themes. *J. Soils Sediments* 20, 4160–4193. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02755-4>
- Estrany, J., García, C., Martínez-Carreras, N., Walling, D.E. (2012). A suspended sediment budget for the agricultural can Revull catchment (Mallorca, Spain). *Zeitschrift fur Geomorphol.* 56, 169–193. <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2012/S-00110>
- Estrany, J., López-Tarazón, J.A., Smith, H.G. (2016). Wildfire Effects on Suspended Sediment Delivery Quantified Using Fallout Radionuclide Tracers in a Mediterranean Catchment. *L. Degrad. Dev.* 27, 1501–1512. <https://doi.org/10.1002/ldr.2462>
- Evrard, O., Batista, P.V.G., Company, J., Dabrin, A., Foucher, A., Frankl, A., García-Comendador, J., Huguet, A., Lake, N., Lizaga, I., Martínez-Carreras, N., Navratil, O., Pignol, C., Sellier, V. (2022). Improving the design and implementation of sediment fingerprinting studies: summary and outcomes of the TRACING 2021 Scientific School. *J. Soils Sediments* 9, 1–14. <https://doi.org/10.1007/S11368-022-03203-1>
- García-Comendador, J., Fortesa, J., Calsamiglia, A., Garcias, F., Estrany, J. (2017). Source ascription in bed sediments of a Mediterranean temporary stream after the first post-fire flush. *J. Soils Sediments* 17, 2582–2595. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1806-1>
- García-Comendador, J., Martínez-Carreras, N., Fortesa, J., Borràs, A., Calsamiglia, A., Estrany, J. (2020). Analysis of post-fire suspended sediment sources by using colour parameters. *Geoderma* 379, 114638. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114638>
- García-Comendador, J., Martínez-Carreras, N., Fortesa, J., Company, J., Borràs, A., Estrany, J. (2021). Combining sediment fingerprinting and hydro-sedimentary monitoring to assess suspended sediment provenance in a mid-mountainous Mediterranean catchment. *J. Environ. Manage.* 299, 113593. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113593>
- García-Comendador, J., Martínez-Carreras, N., Fortesa, J., Company, J., Borràs, A., Palacio, E., Estrany, J. (2023). In-channel alterations of soil properties used as tracers in sediment fingerprinting studies. *Catena* 225, 107036. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2023.107036>
- García-Comendador, J. (2021). Sediment fingerprinting and hydro-sedimentary monitoring as tools for catchment management in Mediterranean environments. Universitat de les Illes Balears.
- Gaspar, L., Blake, W.H., Lizaga, I., Latorre, B., Navas, A. (2022). Particle size effect on geochemical composition of experimental soil mixtures relevant for unmixing modelling. *Geomorphology* 403, 108178. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2022.108178>
- Gaspar, L., Blake, W.H., Smith, H.G., Lizaga, I., Navas, A. (2019). Testing the sensitivity of a multivariate mixing model using geochemical fingerprints with artificial mixtures. *Geoderma* 337, 498–510. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.005>
- Guzmán, G., Quinton, J.N., Nearing, M.A., Mabit, L., Gómez, J.A. (2013). Sediment tracers in water erosion studies: Current approaches and challenges. *J. Soils Sediments* 13, 816–833. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0659-5>
- Klages, M.G., Hsieh, Y.P. (1975). Suspended Solids Carried by the Gallatin River of Southwestern Montana: II. Using Mineralogy for Inferring Sources. *J. Environ. Qual.* 4, 68–73.

- <https://doi.org/10.2134/jeq1975.00472425000400010016x>
- Latorre, B., Lizaga, I., Gaspar, L., Navas, A. (2021). A novel method for analysing consistency and unravelling multiple solutions in sediment fingerprinting. *Sci. Total Environ.* 789, 147804. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147804>
- Lizaga, I., Bodé, S., Gaspar, L., Latorre, B., Boeckx, P., Navas, A. (2021). Legacy of historic land cover changes on sediment provenance tracked with isotopic tracers in a Mediterranean agroforestry catchment. *J. Environ. Manage.* 288, 112291. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112291>
- Lizaga, I., Gaspar, L., Blake, W.H., Latorre, B., Navas, A. (2019). Fingerprinting changes of source apportionments from mixed land uses in stream sediments before and after an exceptional rainstorm event. *Geomorphology* 341, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.05.015>
- Lizaga, I., Gaspar, L., Latorre, B., Navas, A. (2020a). Variations in transport of suspended sediment and associated elements induced by rainfall and agricultural cycle in a Mediterranean agroforestry catchment. *J. Environ. Manage.* 272, 111020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111020>
- Lizaga, I., Latorre, B., Gaspar, L., Navas, A., (2020b). Consensus ranking as a method to identify non-conservative and dissenting tracers in fingerprinting studies. *Sci. Total Environ.* 720, 137537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137537>
- Lizaga, I., Latorre, B., Gaspar, L., Navas, A., (2020c). FingerPro: an R Package for Tracking the Provenance of Sediment. *Water Resour. Manag.* 34, 3879–3894. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02650-0>
- Lizaga, I., Latorre, B., Gaspar, L., Navas, A. (2022). Combined use of geochemistry and compound-specific stable isotopes for sediment fingerprinting and tracing. *Sci. Total Environ.* 832, 154834. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.154834>
- Martínez-Carreras, N., Krein, A., Gallart, F., Iffly, J.F., Pfister, L., Hoffmann, L., Owens, P.N. (2010a). Assessment of different colour parameters for discriminating potential suspended sediment sources and provenance: A multi-scale study in Luxembourg. *Geomorphology* 118, 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.12.013>
- Martínez-Carreras, N., Krein, A., Udelhoven, T., Gallart, F., Iffly, J.F., Hoffmann, L., Pfister, L., Walling, D.E. (2010b). A rapid spectral-reflectance-based fingerprinting approach for documenting suspended sediment sources during storm runoff events. *J. Soils Sediments* 10, 400–413. <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0162-1>
- Martínez-Carreras, N., Udelhoven, T., Krein, A., Gallart, F., Iffly, J.F., Ziebel, J., Hoffmann, L., Pfister, L., Walling, D.E. (2010c). The use of sediment colour measured by diffuse reflectance spectrometry to determine sediment sources: Application to the Attert River catchment (Luxembourg). *J. Hydrol.* 382, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.017>
- Navas, A., Lizaga, I., Gaspar, L., Latorre, B., Dercon, G. (2020). Unveiling the provenance of sediments in the moraine complex of Aldegonda Glacier (Svalbard) after glacial retreat using radionuclides and elemental fingerprints. *Geomorphology* 367, 107304. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107304>
- Navas, A., Lizaga, I., Santillán, N., Gaspar, L., Latorre, B., Dercon, G. (2022). Targeting the source of fine sediment and associated geochemical elements by using novel fingerprinting methods in proglacial tropical highlands (Cordillera Blanca, Perú). *Hydrol. Process.* 36, e14662. <https://doi.org/10.1002/HYP.14662>
- Owens, P.N., (2022). Sediment source fingerprinting: are we going in the right direction? *J. Soils Sediments* 22, 1643–1647. <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03231-x>
- Owens, P.N., Blake, W.H., Gaspar, L., Gateuille, D., Koiter, A.J., Lobb, D.A., Petticrew, E.L., Reiffarth, D.G., Smith, H.G., Woodward, J.C. (2016). Fingerprinting and tracing the sources of soils and sediments: Earth and ocean science, geoarchaeological, forensic, and human health applications. *Earth-Science Rev.* 162, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.012>
- Palazón, L., Gaspar, L., Latorre, B., Blake, W.H., Navas, A., (2015a). Identifying sediment sources by applying a fingerprinting mixing model in a Pyrenean drainage catchment. *J. Soils Sediments* 15, 2067–2085. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1175-6>
- Palazón, L., Gaspar, L., Latorre, B., Blake, W.H., Navas, A., (2014). Evaluating the importance of surface soil contributions to reservoir sediment in alpine environments: A combined modelling and fingerprinting approach in the Posets-Maladeta Natural Park. *Solid Earth* 5, 963–978. <https://doi.org/10.5194/SE-5-963-2014>
- Palazón, L., Latorre, B., Gaspar, L., Blake, W.H., Smith, H.G., Navas, A. (2016). Combining catchment modelling and sediment fingerprinting to assess sediment dynamics in a Spanish Pyrenean river system.

- Sci. Total Environ.* 569–570, 1136–1148. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.189>
- Palazón, L., Latorre, B., Gaspar, L., Blake, W.H., Smith, H.G., Navas, A. (2015b). Comparing catchment sediment fingerprinting procedures using an auto-evaluation approach with virtual sample mixtures. *Sci. Total Environ.* 532, 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.003>
- Palazón, L., Navas, A. (2017). Variability in source sediment contributions by applying different statistic test for a Pyrenean catchment. *J. Environ. Manage.* 194, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.058>
- Pimentel, D., Kounang, N. (1998). Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems* 1, 416–426. <https://doi.org/10.1007/s100219900035>
- van Eck N. J.; Waltman, L. (2010). VOSViewer: Visualizing Scientific Landscapes. [Software]. Recuperado de: <https://www.vosviewer.co>
- Wall, G.J., Wilding, L.P. (1976). Mineralogy and Related Parameters of Fluvial Suspended Sediments in Northwestern Ohio. *J. Environ. Qual.* 5, 168–173. <https://doi.org/10.2134/jeq1976.00472425000500020012x>
- Walling, D.E. (2013). The evolution of sediment source fingerprinting investigations in fluvial systems. *J. Soils Sediments* 13, 1658–1675. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0767-2>
- Walling, D.E., Peart, M.R., Oldfield, F., Thompson, R. (1979). Suspended sediment sources identified by magnetic measurements. *Nature* 281, 110–113. <https://doi.org/10.1038/281110a0>