



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 52 • 2025 • ISSN 2422-5703 • <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revista-asagai>
Gregorini C.A., Ares M.G., Gualde M.S., Fornés M., Arrouy M.J., Chagas C.I. y G. Cazenave
Producción de sedimentos en la naciente del arroyo Videla para el estudio del proceso de erosión hídrica a escala de microcuenca
e022, <https://doi.org/10.59069/24225703e022>

Producción de sedimentos en la naciente del arroyo Videla para el estudio del proceso de erosión hídrica a escala de microcuenca

Sediment yield in the headwaters of Videla stream for the study of the water erosion process at the micro-watershed scale

Camila Ailén Gregorini^{1,2*} María Guadalupe Ares^{1,2,3}
 María Soledad Gualde^{1,2} Magalí Fornés^{1,2} María Julia Arrouy^{1,2,4}
 Celio Ignacio Chagas⁵ Georgina Cazenave^{1,2}

*Contacto

Recibido: 9 de octubre de 2024 ▪ Aceptado: 27 de octubre de 2024 ▪ Publicado: 24 de enero de 2025

Resumen

La erosión hídrica es uno de los principales factores que contribuyen a la pérdida de suelo a nivel global, y el transporte de sedimentos por los cursos de agua está directamente relacionado con el grado de erosión que se produce en las cuencas hidrográficas. Además, el exceso de sedimentos afecta negativamente la calidad del agua y las contribuciones que esta provee a las personas. El presente trabajo tiene como objetivo analizar la producción de sedimentos en una microcuenca agropecuaria, ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, durante los años 2022 y 2023, y evaluar su relación con variables hidrometeorológicas mediante el análisis multivariado de datos. Los sedimentos en suspensión

fueron recolectados bimensualmente del punto de cierre de la microcuenca mediante un dispositivo pasivo. Para cada periodo de recolección se consideraron los eventos erosivos de lluvia-escorrentía registrados y se calcularon las medianas de variables hidrometeorológicas. También se registró el uso del suelo y el estado de los cultivos. En 2022, un año seco con un 20,5 % menos de precipitación y 16 eventos erosivos, se recolectaron 64,08 g de sedimentos. En 2023, un año más húmedo con un 14 % más de lluvia y 27 eventos erosivos, se obtuvieron 267,41 g. El análisis de componentes principales manifestó que en el año 2022 la erosividad de la lluvia influyó en el proceso de escurrimiento, en tanto que la intensidad de las precipitaciones, en la producción de sedimentos. En el caso del año 2023, la cantidad de precipitación estuvo mayormente vinculada a la escorrentía y, a su vez, a

- 1 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- 2 Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff" sede Azul. Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- 3 Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Olavarría. Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- 4 Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Olavarría. Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- 5 Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Artículo publicado en el marco del Dossier Temático "Celebración del 40 aniversario de la creación del Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff" (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires - Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires).

la producción de sedimentos que drenan la cuenca. Se puede concluir que, de manera relativa, para el año 2023 el proceso de erosión hídrica fue mayor.

Palabras clave: análisis multivariado de datos, cabecera de cuenca hidrográfica, Sistema de Tandilia, variables hidrometeorológicas.

Abstract

Water erosion represents a significant contributor to soil loss on a global scale. The extent of erosion occurring within a watershed directly correlates with the quantity of sediment transported through watercourses. Furthermore, the presence of excess sediment has an adverse impact on water quality and the contributions it makes to people. The present study aims to analyse sediment yield in an agricultural micro-watershed located in the centre of Buenos Aires province during the years 2022 and 2023. Additionally, the study will evaluate the relationship between sediment yield and hydrometeorological variables through multivariate data analysis. The collection of suspended sediments was conducted every two months from the outlet of the watershed using a passive device. For each collection period, the recorded rainfall-runoff erosive events were considered, and the medians of the relevant hydrometeorological variables were calculated. Additionally, data were collected on land use and crop status. In 2022, a year characterised by low precipitation levels (20.5 % less than the average) with a relatively high number of erosive events (64.08 g of sediment was collected). In 2023, a year with higher precipitation levels (14 % more rainfall) and a greater number of erosive events (27), the total sediment yield was 267.41 g. Principal component analysis demonstrated that in 2022, rainfall erosivity exerted an influence on the runoff process, whereas rainfall intensity exerted an influence on sediment production. In the case of 2023, the amount of precipitation was predominantly linked to runoff and, in turn, to the production of sediment draining the catchment. It can be concluded that, relatively, the process of water erosion was higher in 2023.

Keywords: hydrometeorological variables, multivariate data analysis, Tandilia System, watershed head.

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica, causante de la pérdida del suelo debido a la acción del agua, es el principal proceso de degradación de tierras a escala global (Li y Fang, 2016). Este fenómeno se manifiesta dentro de las cuencas agropecuarias, ocasionando el deterioro del rendimiento agrícola y de las propiedades del suelo. Además genera impactos por fuera de estos sistemas, degradando la calidad de los cuerpos de agua y la contribución de la naturaleza a las personas debido al transporte y sedimentación de partículas en altas tasas (Díaz et al., 2018; Chagas y Kraemer, 2023).

Si bien la erosión hídrica es un proceso dinámico que depende de la interacción de diferentes factores como la topografía, las propiedades del suelo y de su uso, la precipitación y la escorrentía son los iniciadores y desencadenantes de tal problemática (Wei et al., 2007). La energía cinética de las gotas de lluvia, la intensidad y la cantidad de las precipitaciones generan el desprendimiento de las partículas del suelo. A su vez, el agua que escurre superficialmente no solo desprende estas partículas, sino que también las transporta hacia diferentes áreas dentro de una cuenca (Blanco y Lal, 2008).

La cuantificación de la producción y transporte de los sedimentos que drenan los cursos de agua puede vincularse directamente al grado de erosión que afecta el área de una cuenca (Andreazzini et al., 2014). Una de las dificultades para llevar a cabo el monitoreo de la producción de sedimentos es

el alto costo del equipamiento necesario, además de su escasa capacidad de coleccionar muestras de forma permanente de una masa suficiente para ser analizadas geoquímicamente. Por ese motivo Phillips et al. (2000) desarrollaron un recolector de muestras integradas en el tiempo, de construcción e instalación sencilla y que resuelve las problemáticas mencionadas de dicho monitoreo. De este modo, se puede abordar la caracterización de manera relativa de los procesos erosivos sujetos a una cuenca hidrográfica (Schindler Wildhaber et al., 2012; Pearks et al., 2013).

El monitoreo exhaustivo de variables meteorológicas, hidrológicas y, a su vez, de la cuantificación de la producción y transporte de los sedimentos que drenan los cursos de agua, son necesarios a la hora de estudiar en detalle los procesos erosivos (Minella et al., 2022). La implementación de un análisis estadístico multivariado resulta una herramienta de gran utilidad a la hora de establecer relaciones entre las variables implicadas y así poder interpretar estos procesos dinámicos y complejos.

Diversos autores han analizado las relaciones entre las precipitaciones, el proceso de escurrimiento y la producción de sedimentos por erosión hídrica a escala de cuenca (Restrepo et al., 2006; Rodríguez Blanco et al., 2019; Rajbanshi y Bhattacharya, 2020). Los análisis de los procesos de escurrimiento y erosión a dicha escala son apropiados debido a que una cuenca es una unidad hidrológica en la que ocurren los procesos mencionados. Además, en estas áreas es posi-

ble la aplicación de medidas de control y manejo (Cerdan et al., 2004). En el área de estudio propuesta en este trabajo, se ha analizado la relación entre variables meteorológicas e hidrológicas con la concentración de sedimentos generados por erosión hídrica a escala de eventos puntuales de crecida (Ares et al., 2014; Ares et al., 2016).

El objetivo de este estudio es analizar la producción de sedimentos en una microcuenca agropecuaria durante los años 2022 y 2023, y explorar su asociación con variables hidrometeorológicas mediante la implementación de estadística descriptiva y análisis multivariado de datos. Con los resultados obtenidos se aborda la caracterización, de manera relativa, del proceso de erosión hídrica en dos años en la región bajo estudio.

ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del arroyo Del Azul se sitúa en el centro de la provincia de Buenos Aires, entre el sistema de Tandilia y la cuenca del Río Salado (Figura 1a). Abarca un área de 6.237 km² en la que se concentran importantes actividades productivas como la ganadería, la agricultura y la minería. Presenta un clima templado húmedo, con una precipitación media anual de 962 mm (serie 1989- 2018) según datos del Servicio Meteorológico Nacional correspondiente a la estación Azul Aero. Las precipitaciones se concentran principalmente entre los meses de octubre y abril.

La subcuenca en estudio se ubica en la zona NNO del

sistema de Tandilia (Nágera, 1940; Cingolani, 2005) (Figura 1b). Corresponde a una microcuenca emplazada en la naciente del arroyo Videla, parte superior de la cuenca del arroyo Del Azul. Abarca 566 ha con una pendiente promedio de 3 %. Exhibe características propias de un ambiente de cabecera de cuenca hidrográfica, con desarrollo de humedales que se expanden y contraen en asociación a periodos húmedos y secos (Ares et al., 2020).

En términos geomorfológicos, se sitúa en la unidad Dominio Serrano (Zárate y Mehl, 2010), donde los afloramientos ígneo-metamórficos del Complejo Buenos Aires (Marchese y Di Paola, 1975) representan las formas más características. El basamento se emplaza a escasa profundidad y presenta importantes niveles de alteración y fracturas que facilitan el flujo de agua subterránea a los humedales y el arroyo, este último de régimen permanente (Gregorini et al., 2024). Entre las divisorias dadas por los afloramientos rocosos, se desarrollaron secuencias sedimentarias loésicas de edad cenozoica (Zárate y Mehl, 2010).

Respecto a los suelos y en base a INTA (1992), predominan los Argiudoles Típicos con buen drenaje, y en menor proporción Hapludoles y Argiudoles Líticos, en las zonas de cerros y lomadas. Estos suelos ricos en materia orgánica se encuentran bajo uso agropecuario, con la implementación de siembra directa y rotación de cultivos de invierno (trigo o cebada) y cultivos de verano (soja, maíz o girasol). La microcuenca se encuentra monitoreada desde el año 2011 para el estudio del proceso de erosión hídrica (Ares et al., 2014).

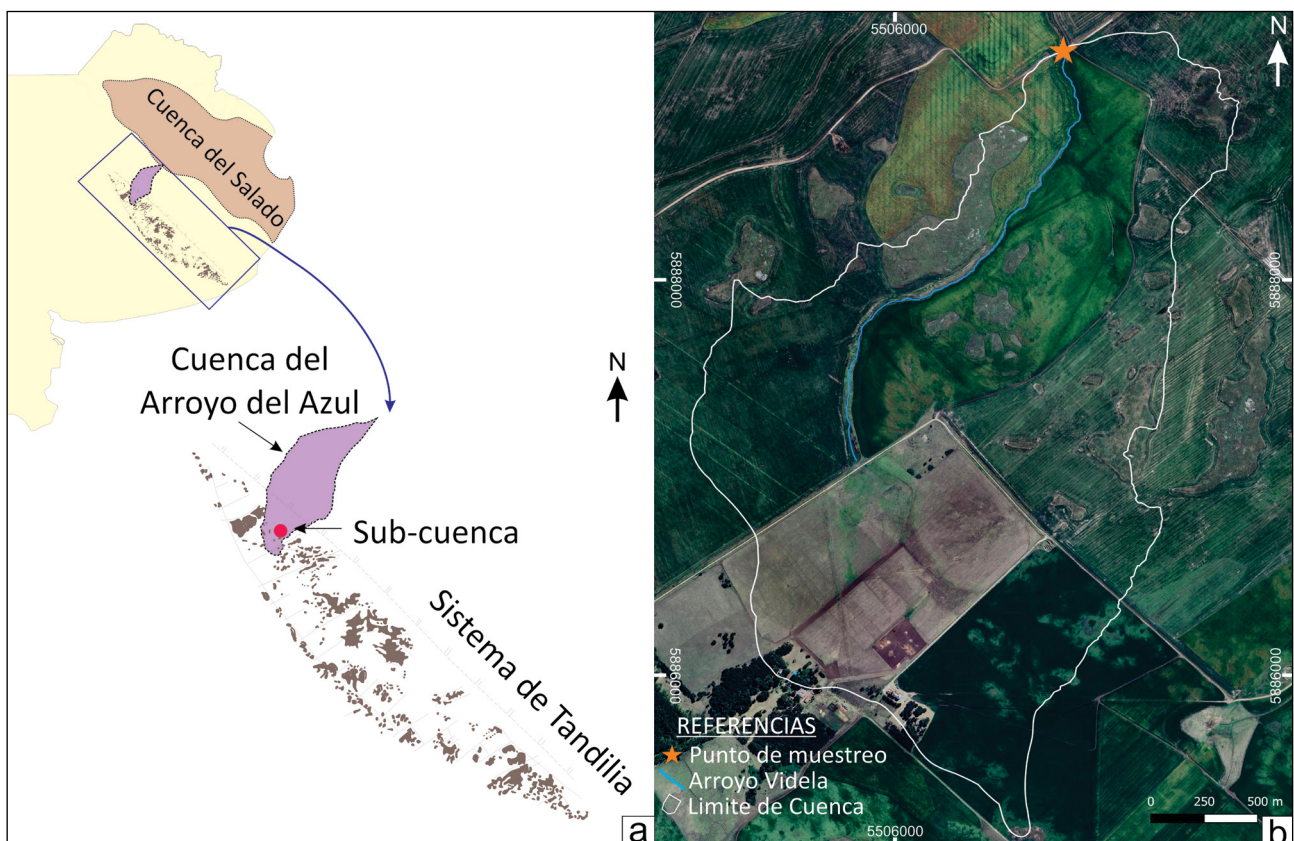


Figura 1. Mapa de ubicación de la cuenca del arroyo Del Azul. b) Mapa de ubicación de la subcuenca en estudio.

METODOLOGÍA

El análisis se realizó con información recolectada en los años 2022 y 2023, integrando datos meteorológicos, hidrológicos, producción de sedimentos o sólidos totales y de uso del suelo.

Los datos meteorológicos se obtuvieron de una estación automática emplazada a 5 km del punto de cierre de la microcuenca que pertenece al sistema de red de alerta de inundaciones del Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff” (IHLLA). La precipitación se registró cada 10 minutos, con una precisión de 0,20 mm, mediante un sistema de cangilones. A partir de estos datos se realizó el cálculo de variables como la precipitación total (P), la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) y la erosividad de la precipitación (EI_{30}), siendo esta última el producto entre su energía cinética e I_{30} (Tabla 1). La energía se determinó según la ecuación establecida por Wischmeier y Smith (1978):

$$e = 0,119 + 0,0873 \log_{10}(i) \quad (1)$$

dónde e representa la energía cinética (MJ (ha mm)) e i la intensidad de la lluvia (mm h⁻¹).

El escurrimiento se evaluó mediante la medición del nivel de agua, en intervalos de 30 minutos, a través de un sensor de presión situado en el punto de cierre de la microcuenca (Figura 1b). Cada valor de altura de nivel de agua se transformó en caudal mediante la elaboración de la curva altura-caudal (h-Q) y la ecuación de Manning (Dingman, 2015). Para la separación del caudal total y el caudal base se ejecutó un filtro digital (Rodríguez et al., 2000) basado en uno de los métodos revisados por Chapman (1999) y Nathan y McMahon (1990). El filtro elimina la componente de alta frecuencia del hidrograma (escorrentía directa) y define la componente de caudal base. Así, las variables calculadas fueron (Tabla 1): caudal pico (Qp), volumen total escurrido (Vt), duración de la crecida (Dc), tiempo al pico (Tp), escurrimiento directo (ED), el coeficiente de escurrimiento (CE), caudal base (Qb) y la intensidad de la crecida (IC). Para el caudal base se consideró el mínimo valor de las 12 horas previas al inicio de cada evento de precipitación-escorrentía (Ares et al., 2020). La intensidad de la crecida vincula la diferencia entre el caudal pico y el caudal base en relación al tiempo al pico (Oeurng et al., 2010).

La recolección del sedimento transportado en suspensión por el cauce se realizó de manera bimensual a través de un dispositivo pasivo (Phillips et al., 2000). Se trata de un dispositivo que, sumergido en el cuerpo de agua, recolecta el material que drena la cuenca en periodos de tiempo. Las muestras recolectadas se dejaron sedimentar en el Laboratorio de Suelo del IHLLA para su posterior separación del líquido. La separación se ejecutó mediante técnicas propuestas por ASTM (2007). Se tuvo en cuenta la masa de sólidos totales recolectadas en cada muestra (S; Tabla 1). Por último, se consideró el uso del suelo y el estado de los cultivos en cada periodo registrado en las campañas, como variables cualitativas que contribuyen al entendimiento de la dinámi-

Tabla 1. Variables estudiadas, abreviaturas y unidades.

Variable	Abreviatura	Unidad
Variables Meteorológicas		
Precipitación total	P	mm
Intensidad máxima en 30 min	I_{30}	mm h ⁻¹
Erosividad de la precipitación	EI_{30}	mm h ⁻¹
Variables de Escurrimiento		
Volumen total escurrido	Vt	m ³
Escurrimiento directo	ED	mm
Coefficiente de escurrimiento	CE	%
Intensidad de la crecida	IC	m ³ m ⁻¹
Caudal pico	Qp	m ³ m ⁻¹
Caudal base	Qb	m ³ m ⁻¹
Duración de la crecida	Dc	h
Tiempo al pico	Tp	h
Variables Sedimentológicas		
Sólidos totales	S	g

ca del proceso de estudio (Mota et al., 2021). En cuanto a las características de los cultivos se tuvo en cuenta el grado de cobertura (bajo, medio y alto) que ofrece el residuo, el cultivo de invierno y el cultivo de verano sobre el suelo de acuerdo con el criterio de Ares et al. (2020).

Se definieron 10 periodos de análisis considerando los sedimentos captados por el muestreador y los eventos erosivos de precipitación-escorrentía (P-Esc), con lluvias mayores a 12,7 mm (Wischmeier y Smith, 1978), ocurridos en ese intervalo de tiempo. En base a los eventos P-Esc, se calcularon las medianas de las variables I_{30} , EI_{30} , Qp, Qb, ED, CE, IC, Dc y Tp para darle el valor al periodo. Para las variables P y Vt se obtuvo la sumatoria de los datos en cada periodo.

Tratamiento estadístico de los datos

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo a fin de explorar y caracterizar las variables del sistema durante los años estudiados (2022 y 2023). Se calcularon los valores mínimos, máximos, medias, desvíos estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de todas las variables involucradas en este estudio (Tabla 1). Para este análisis, se consideraron los eventos erosivos registrados durante ambos años.

Para una caracterización específica, se trabajaron de forma independiente los datos correspondientes a los años 2022 y 2023. A partir de ello, se generó una matriz de correlación por año y se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson utilizando el entorno del software RStudio (RStu-

dio Team, 2024). El análisis de los coeficientes permitió identificar relaciones lineales relevantes (r mayores a 0,7) entre las variables, y estimar la intensidad y dirección de estas relaciones (Helsel et al., 2019). Posteriormente, empleando las matrices de correlación, se efectuó un Análisis de Componentes Principales (ACP) en ambiente RStudio. El objetivo del ACP fue reducir la multicolinealidad de las variables y producir componentes que sean estadísticamente independientes entre sí y capturen la máxima varianza de las variables originales en pocas dimensiones (Jolliffe, 2002). A partir de este análisis, se evaluaron las puntuaciones factoriales que expresan la contribución de cada variable en las componentes y se analizó el valor del coseno cuadrado (\cos^2) para evaluar la calidad de representación de las variables en las primeras dos componentes (Lê et al., 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del sistema en los años 2022 y 2023

El año 2022 registró una precipitación anual de 764,2 mm, en tanto que el 2023 acumuló 1.091,8 mm. De acuerdo con la precipitación media anual para la zona estudiada, el año 2022 estuvo por debajo de la misma en un 20,5 %, mientras que el año 2023 registró un 14 % más alta. El mes más lluvioso en 2022 fue marzo (148,4 mm). Para el 2023 los meses de marzo (183 mm) y diciembre (269,2 mm) superaron ampliamente lo registrado en el año anterior. En cuanto a la carga de sedimentos colectados, en el año 2022 en total se contabilizaron 64,08 g, mientras que en el año 2023 se recolectaron 267,41 g.

En la Tabla 2 se resume la estadística descriptiva de las variables hidro-meteorológicas de los eventos erosivos acontecidos en ambos años. En la totalidad del tiempo que

abarca este estudio se registraron 43 eventos erosivos, siendo 16 los eventos ocurridos en el 2022 y 27 los eventos acontecidos en el año 2023. En el inicio del 2022 se produjo un evento erosivo de gran magnitud el cual aportó mayormente a los valores máximos de P , EI_{30} , Qp , Qb , ED , CE e IC . Este evento repercutió en el resultado del promedio y desvío estándar (DE) como un evento particular dentro del conjunto de eventos erosivos que se dan en dicho año. En el 2023 se registraron 11 eventos más que en 2022, sin embargo, todos fueron de características más homogéneas. Si bien la media de las precipitaciones (P) fue menor en el año 2022, nótese que la media del caudal base (Qb) para dicho año fue mayor. Este fenómeno podría deberse a una respuesta tardía de los caudales base con respecto a las precipitaciones en el cual el estado del sistema, en un momento dado, es dependiente de los ingresos en periodos previos (Ares et al., 2024).

Durante los años de estudio se analizaron 10 periodos, que incluyeron dos meses de muestreo cada uno (Tabla 3). Los primeros 5 periodos corresponden al 2022 y los 5 restantes al año 2023 e inicio del 2024. Es importante destacar que los periodos calculados cuentan con distinta cantidad de eventos erosivos cada uno, siendo los dos últimos (periodo 9 con 6 eventos y periodo 10 con 8 eventos) los que registraron la mayor cantidad.

En ambos años se desarrollaron tanto cultivos de invierno como de verano (Tabla 3). La dinámica propia de las fases fenológicas de los cultivos determina el grado de cobertura en la superficie del suelo, y por ende, la manifestación del efecto protector que dicha cobertura ejerce sobre el suelo contra los agentes erosivos. De tal modo, la cubierta más abundante correspondió a los periodos de recolección entre el verano y el inicio del otoño. En esa etapa, los cultivos de verano alcanzan su máximo desarrollo, y las parcelas ocupa-

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las variables en estudio de los años 2022 y 2023.

Variable	2022 = 16 eventos erosivos				2023 = 27 eventos erosivos			
	Rango	Media	DE	CV	Rango	Media	DE	CV
P	3,2 - 109	31,95	23,99	75,09	12 - 65,2	33,29	16,51	49,58
I30	4,8 - 72,4	21,6	19,52	90,35	4,4 - 53,6	25,32	13,25	52,32
EI30	10,58 - 1324,68	231,35	352,97	152,57	8,87 - 713,17	236,93	205,15	86,59
Vt	1262,07 - 26254,23	6471,76	6885,63	106,39	766,68 - 16775,81	4485,31	4108,39	91,60
Qp	1,059 - 68,820	7,048	16,63	235,89	0,878 - 36,495	6,0350	9,83	162,89
Qb	0,650 - 2,065	1,314	0,41	30,89	0,549 - 1,834	0,888	0,32	36,59
ED	0,008 - 2,652	0,330	0,66	198,70	0,009 - 2,264	0,248	0,44	177,22
CE	0,063 - 2,278	0,676	0,69	101,77	0,053 - 3,851	0,613	0,75	122,54
IC	0,0001 - 0,1711	0,0139	0,04	304,35	0,0003 - 0,2087	0,0273	0,06	223,06
Dc	15 - 94	45	21,62	48,04	13,5 - 74	41,5	17,51	42,22
Tp	4 - 30	11,6	6,85	58,92	0,5 - 22	8,9	5,59	62,47

das por los residuos de cultivos del invierno anterior (trigo y/o cebada) presentan abundante cobertura, o son ocupadas con cultivo de soja de segunda siembra. Por el contrario, los periodos de recolección de sedimentos del fin del otoño y del invierno coinciden con el mínimo grado de cobertura de los cultivos, cuando la superficie se encuentra ocupada por los residuos del ciclo agrícola anterior y por los cultivos de invierno en los estados iniciales de crecimiento, que activan su desarrollo hacia el inicio de la primavera. Paulatinamente, entre la primavera y el inicio del verano, el efecto protector de la vegetación vuelve a incrementarse (Ares et al., 2007).

Análisis de correlación

En la Figura 2 se observa la representación gráfica de

las matrices de correlación entre variables de los años 2022 y 2023. Los círculos representan la magnitud del coeficiente de correlación de Pearson, donde un mayor tamaño del círculo indica una correlación lineal cercana a 1 o -1, mientras que los colores azules indican correlaciones positivas y los colores rojos indican correlaciones negativas. A continuación, se describen las correlaciones más relevantes entre las variables consideradas en este estudio.

En base a los resultados de la matriz del año 2022 (Figura 2a), se identificó que la correlación positiva más alta se da entre las variables El_{30} y la IC ($r = 0,99$), mientras que la correlación negativa más alta se da entre I_{30} y Tp ($r = -0,90$). En cuanto a la variable S, se correlaciona negativamente con P, Qp, Qb, ED, CE y Tp (ninguna supera un valor de r de 0,3), en tanto que de manera positiva se correlaciona con I_{30} , El_{30} ,

Tabla 3. Periodo (Pe), fecha, cantidad de eventos erosivos, cantidad de sólidos totales (S), estación del año, uso del suelo y grado de cobertura de los periodos bajo estudio.

Pe	Fecha	Cantidad eventos	Sólidos totales (S)	Estación	Uso del Suelo	Grado de cobertura
1	15/02/22 - 06/04/22	4	9,51	Verano - Inicio del Otoño	Maíz y soja	Alta
2	06/04/22 - 27/06/22	2	12,16	Otoño	Fin de ciclo de cultivos de verano – residuo cultivo verano	Media a baja
3	27/06/22 - 01/09/22	3	21,68	Invierno	Trigo/cebada - residuo cultivo verano	Baja
4	01/09/22 - 25/11/22	4	14,22	Fin Invierno - Primavera	Trigo/cebada – residuos de cultivos de verano - implantación de maíz	Baja a media
5	25/11/22 - 13/01/23	3	6,51	Primavera - Inicio del Verano	Maíz - trigo/cebada estadio final	Media a alta
6	13/01/23 - 14/04/23	5	14,54	Verano - Inicio del Otoño	Maíz – soja de segunda siembra-residuo del cultivo de invierno	Alta
7	14/04/23- 15/06/23	5	100,17	Otoño	Último estadio cultivo de verano - residuo cultivo verano	Media a baja
8	15/06/23 - 23/08/23	3	4,38	Invierno	Trigo/cebada - residuo cultivo verano	Baja
9	23/08/23 - 14/11/23	6	26,54	Fin Invierno - Primavera	Residuo cultivo verano – trigo/cebada	Baja a media
10	14/11/23 - 17/01/24	8	121,78	Primavera - Inicio del Verano	Inicio cultivos de maíz y de soja - fin trigo/cebada - inicio soja de segunda	Media a alta

Vt, IC y Dc. De estas últimas, las correlaciones más altas se observan con I_{30} ($r = 0,53$) y Dc ($r = 0,22$). En general se destaca que para la variable S, las correlaciones con las demás variables del sistema durante el año 2022 fueron bajas. Se observan las siguientes correlaciones positivas con r mayores a 0,7:

- la intensidad en 30 minutos de la precipitación con el caudal pico y con la intensidad de la crecida;

- la erosividad de la precipitación con el caudal pico, el caudal base, el escurrimiento directo, el coeficiente de escurrimiento y con la intensidad de la crecida.

En la matriz del año 2023 (Figura 2b), la correlación negativa más alta se da entre IC y Tp ($r = -0,63$), mientras la más positiva se da entre la variable S e IC ($r = 0,97$). En este caso la producción de sedimentos muestra una fuerte relación positiva con el Qp, el ED, el CE y con la IC (valores de r mayores a 0,85). Además, se correlaciona positivamente con P, I_{30} y el Qb pero con valores de r que no superan 0,45. La cantidad de sólidos totales muestra la correlación negativa más alta con Tp ($r = -0,46$). Se reconocieron las siguientes correlaciones relevantes:

- la precipitación se correlaciona de manera positiva con la intensidad en 30 minutos, la erosividad de la precipitación y el escurrimiento directo;

- el volumen total con el caudal base y con la duración de la crecida.

Análisis de componentes principales para el año 2022

Los resultados del ACP (Figura 3) muestran que la primera componente principal (Dim.1) explica el 65,2 % de la

variabilidad de los datos, mientras que la segunda componente (Dim.2) el 15,5 %. Ambas explican el 80,7 %, lo que representa un porcentaje significativo dado que la mayor parte de la información proveniente de los datos originales está contenida en ambas dimensiones (Jolliffe, 2002). En la Figura 3a se muestran las puntuaciones o cargas factoriales de las variables en las dos primeras dimensiones. En la primera componente principal (Dim.1) las variables EI_{30} , Vt, Qp, Qb, ED, CE e IC muestran altas cargas positivas. En la segunda componente principal (Dim.2) las variables S e I_{30} tienen la mayor carga negativa y se correlacionan negativamente con Tp. A través del análisis del coseno cuadrado (Figura 3c), en la primera componente se observa que las variables mejor representadas son EI_{30} , Qp, Qb, ED, CE e IC, mientras que, en la segunda componente, lo es la variable S. En el gráfico biplot (Figura 3b) se puede observar la proyección de los autovectores y los periodos estudiados en el espacio de las primeras dos dimensiones (Dim.1 y Dim.2). La proyección de CE, ED, Qb, Qp, Vt, EI_{30} , Dc e IC muestra ángulos bajos evidenciando una alta correlación positiva. Tp e I_{30} se proyectan opuestas, denotando una alta correlación negativa. El autovector S está representado casi en su totalidad por la segunda componente, débilmente correlacionada con I_{30} (Figura 3a). En base a estos resultados se puede interpretar que, siendo EI_{30} una variable relacionada con la energía y la intensidad de la precipitación, podría ser la de mayor influencia en los procesos de escurrimiento (el proceso mejor explicado en la Dim.1). En el caso de la producción de sedimentos, podría señalarse que para el 2022, la variable que más influye es la intensidad de la precipitación (proceso explicado en la Dim.2).

Focalizando en los periodos, en el gráfico biplot (Figura 3b) podemos observar que los periodos 4 y 5 están próximos entre sí y relacionados al Tp, contando con alta puntuación

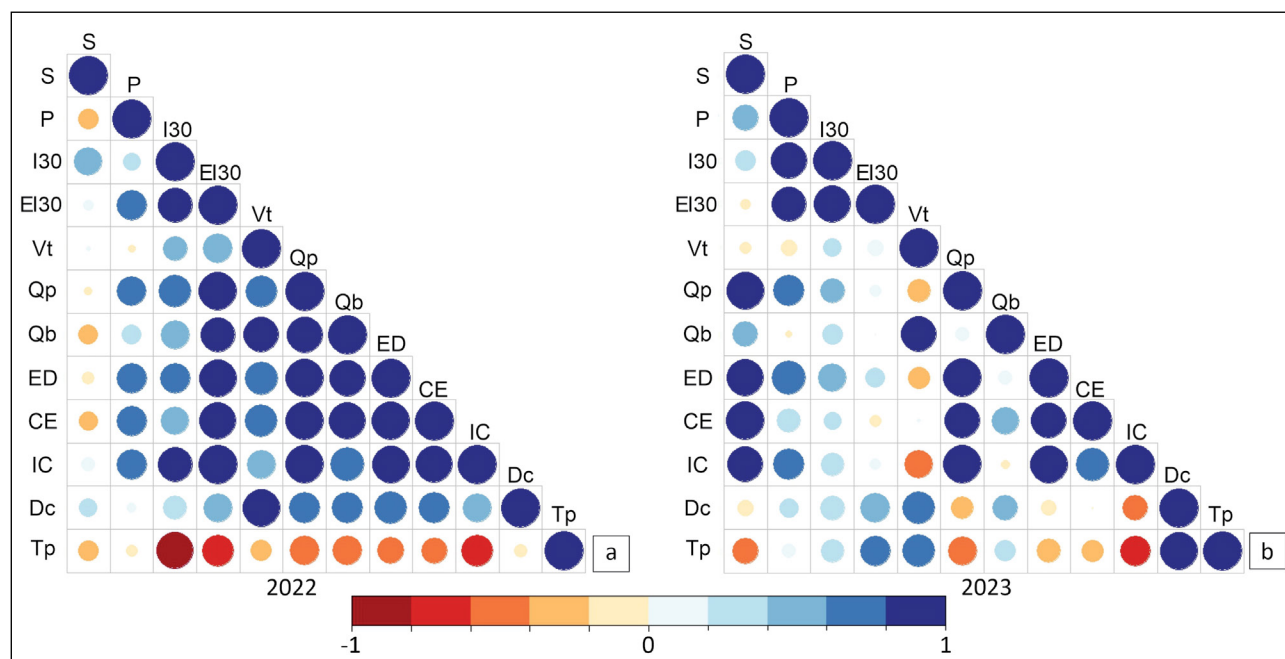


Figura 2. Matrices de correlación de los años 2022 y 2023, obtenidas a partir del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson.

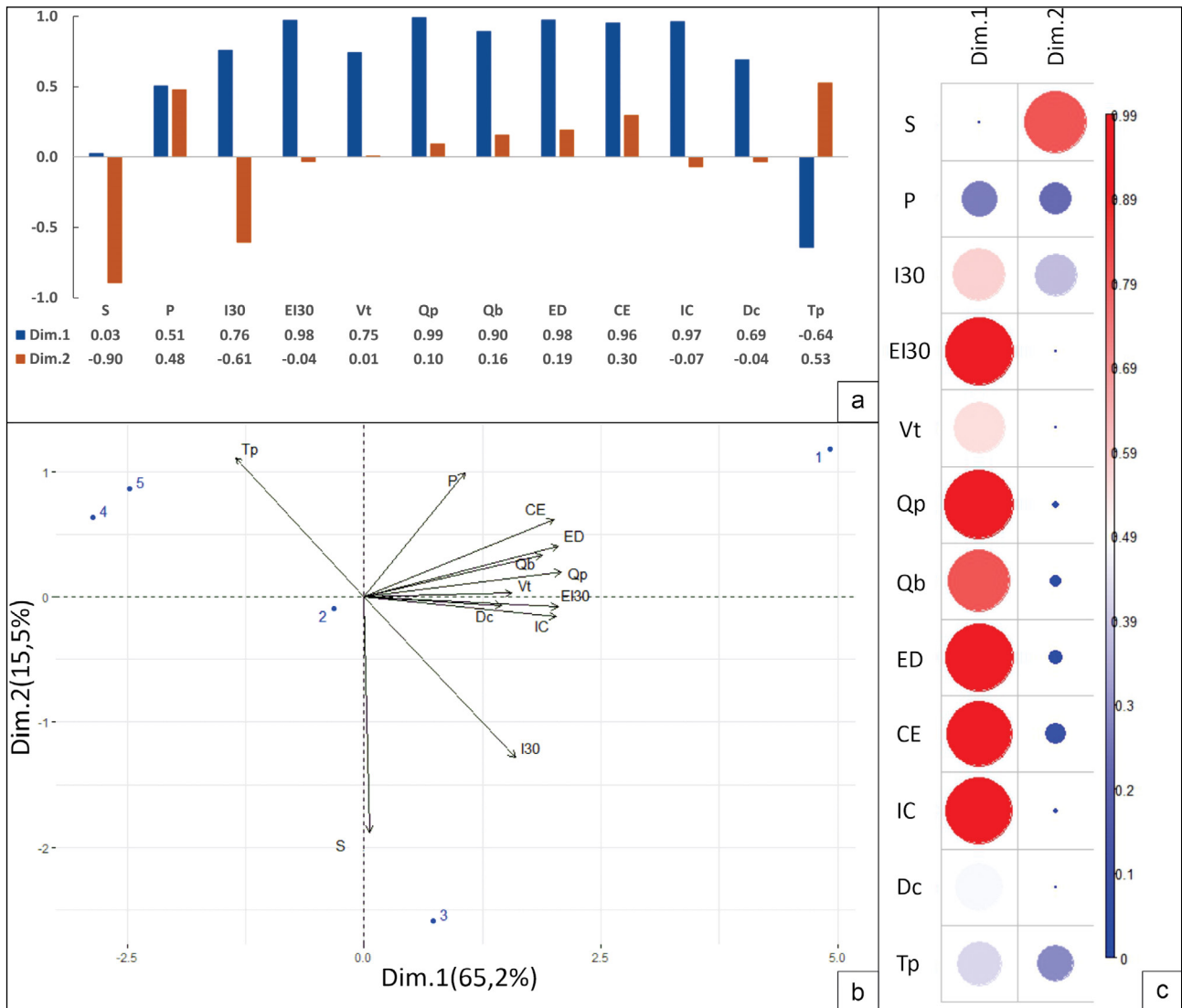


Figura 3. Análisis de componentes principales para el año 2022. a) Cargas factoriales de las variables en las dos primeras dimensiones. b) Gráfico biplot, variables y periodos representados en las primeras dos dimensiones. c) Gráfico de calidad de representación de las variables a través del valor del coseno cuadrado (\cos^2).

factorial de la variable. El periodo 1 se encuentra en el primer cuadrante relacionado a los autovectores CE, ED, Qb, Qp, Vt, EI_{30'}, Dc e IC. Esto último podría estar condicionado por el evento erosivo de gran magnitud mencionado anteriormente, donde el Qp supera ampliamente la media anual del 2022 (Qp de 68,82 m3s⁻¹). A pesar de que el periodo revela un mayor escurrimiento, la cantidad de sólidos totales recolectados fue menor, posiblemente dado por el alto grado de cobertura que ofreció la vegetación al suelo (Tabla 3). Los periodos 4 y 5, también se localizan de manera opuesta al desarrollo del autovector S lo cual concuerda con la baja cantidad de sedimentos recolectados. El periodo 2 se ubica cerca de la ordenada al origen, lo cual sugiere que está caracterizado por valores promedio de las variables implicadas. Por último, el periodo 3, aislado de los demás, se encuentra bien representado por la segunda componente donde es la variable S la que explica en mayor medida la variabilidad de los datos. Esto podría indicar que durante el periodo 3, posiblemente debido al bajo grado de cobertura del suelo (Tabla

3), la producción de sedimentos fue la más alta del año (Liu et al., 2018).

Análisis de componentes principales para el año 2023

Los resultados del ACP (Figura 4) muestran que la primera componente principal (Dim.1) explica el 47,1 % de la variabilidad de los datos, mientras que la segunda componente principal (Dim.2) el 31,8 %. Ambas explican el 78,9 % de la varianza total del sistema. Las variables S, P, Qp, ED, CE e IC exhiben altas cargas positivas en la primera componente, mientras que las variables I_{30'}, EI_{30'}, Vt, Dc y Tp lo hacen en la segunda componente (Figura 4a). Las variables que se representan mejor en la primera dimensión (Dim.1) son S, Qp, ED, CE, IC y Dc. En el caso de la segunda dimensión (Dim.2), las variables EI_{30'}, Dc y Tp son las que obtienen la mayor calidad de representación (Figura 4c). En el diagrama biplot, se observa que los autovectores CE, ED, Qp, IC y S son próximos entre sí (Figura 4b). Se puede ver que la producción de sedi-

mento está asociada a variables de escurrimiento, siendo P la variable meteorológica mejor relacionada al conjunto. En base a los resultados se podría establecer que la producción de sedimentos está fuertemente asociada al proceso de escurrimiento (Zhang et al. 2016), posiblemente inducido por la cantidad de precipitaciones (este proceso se ve explicado por la primera componente). En la segunda componente se observa que hay relación entre las variables meteorológicas, I30 y EI30, y una posible respuesta en los volúmenes de agua escurridos, en la duración y en los tiempos al pico de las crecidas.

En cuanto a los periodos en el gráfico biplot (Figura 4b), se observa que el 6 y el 9 se encuentran agrupados, el 7 se ubica cercano a la ordenada al origen, mientras que los periodos 8 y 10 se muestran alejados entre sí. En el caso de los periodos 6 y 9, los autovectores Tp, Vt y Dc se presentan orientados en su dirección. El periodo 7 sugiere valores promedio. En el caso de los periodos 8 y 10 se alejan por presen-

tar valores con características extremas. El periodo 10 está representado hacia el espacio de los autovectores S, Qp, DE, CE e IC, mientras que el periodo 8 presenta correlaciones negativas con respecto a estos autovectores. En el periodo 10, donde se produjo la mayor cantidad de eventos erosivos, se registró una precipitación acumulada de 369,4 mm, en contraposición al periodo 8 que fue el más seco (95,6 mm) y con el registro de solo 3 eventos. Aquello pudo haber influido en la escasa producción de sedimentos en el periodo 8, y una gran cantidad en el periodo 10, aun teniendo este último un grado de cobertura medio a alto (Tabla 3).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron y analizaron exhaustivamente datos hidro-meteorológicos y de sólidos totales recolectados en años con características meteorológicas contrastantes, en una microcuenca agropecuaria. A través de los

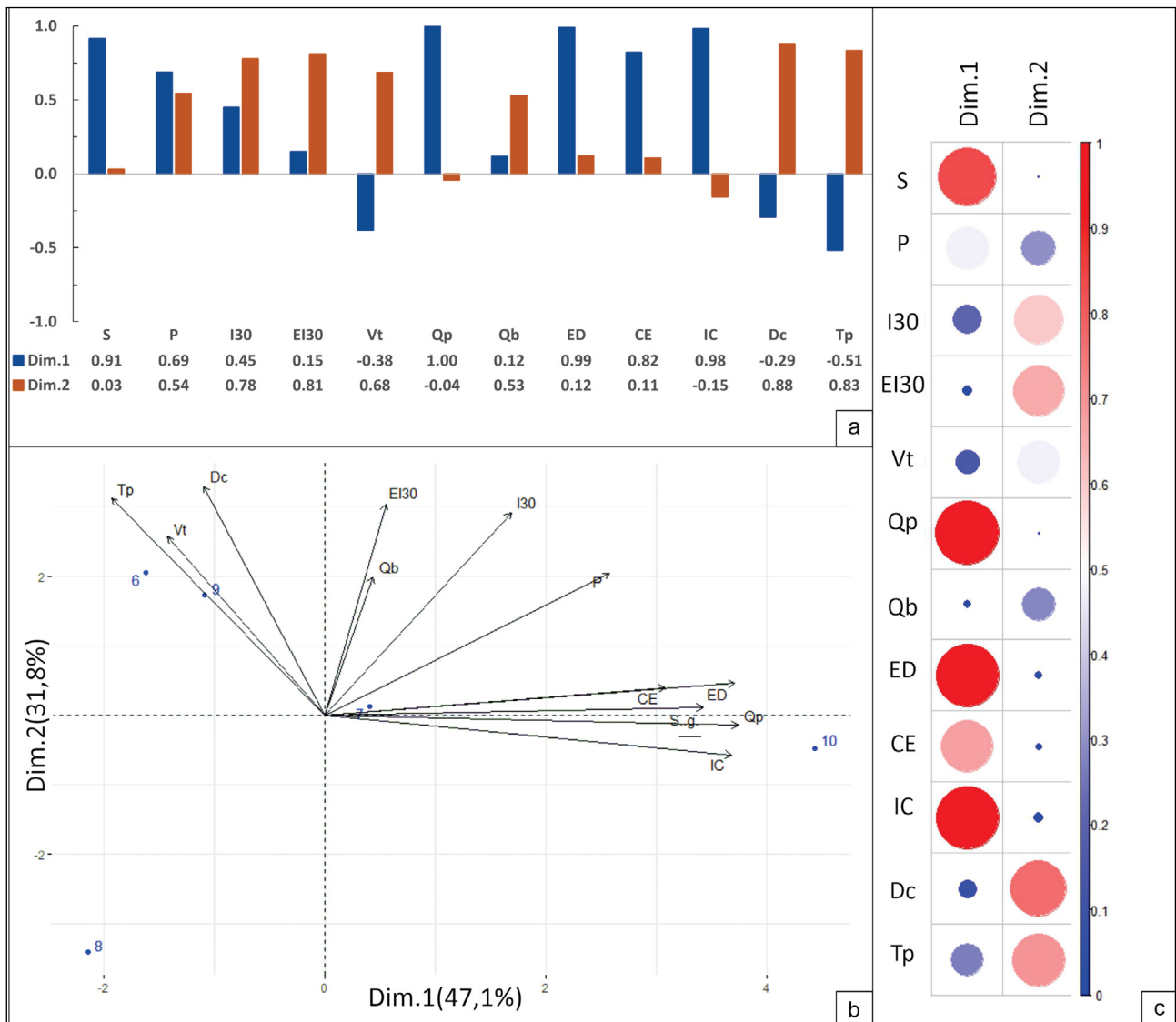


Figura 4. Análisis de componentes principales para el año 2023. a) Cargas factoriales de las variables en las dos primeras dimensiones. b) Gráfico biplot, variables y periodos representados en las primeras dos dimensiones. c) Gráfico de calidad de representación de las variables a través del valor del coseno cuadrado (cos²).

resultados obtenidos se destaca que:

El año 2022 se caracterizó por ser un año seco, con el registro de un 20,5 % menos de precipitación con respecto a la media anual y solo 16 eventos erosivos. En contraposición, el 2023 fue un año más húmedo con un 14 % más de precipitación acumulada y el registro de 27 eventos erosivos. Estas condiciones influyeron en la producción de sedimentos, siendo 64,08 g en total en el 2022 y 267,41 g en el año 2023. Se puede concluir que, de manera relativa, para el año 2023 el proceso de erosión hídrica fue mayor.

El análisis de componentes principales para el año 2022 explica en total, entre las dos primeras dimensiones, el 80,7 % de la varianza de los datos, en tanto que el ACP del 2023 el 78,9 %.

Estos porcentajes representan adecuadamente las condiciones del sistema en el periodo de estudio. Ambos ACP manifiestan distintas asociaciones entre las variables: en el año 2022 la erosividad de las precipitaciones es la variable meteorológica vinculada a los procesos de escurrimiento, mientras que la intensidad de las precipitaciones influye, en mayor medida, en la carga de sedimentos. En el año 2023 la precipitación estaría vinculada a la escorrentía, en tanto que la carga de sedimentos estaría fuertemente relacionada con la dinámica de las variables hidrológicas.

La cobertura en la cuenca interacciona con los procesos hidro-sedimentológicos. En tal sentido, el periodo 1 (2022) contó con el registro de un evento erosivo de gran magnitud, no obstante, este no generó un impacto en la producción de sedimentos dado por el alto grado de cobertura del suelo. En contraposición, en el periodo 10 (2023), si bien se produjo bajo una cobertura media a alta, las altas precipitaciones que generaron un mayor proceso de escurrimiento repercutieron en la producción de sedimentos para finales del año. Las con-

diciones de escasa cobertura propias del invierno ocasionaron pérdidas de suelo relativamente altas ante lluvias erosivas, tal como se observó en el año 2022.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el CONICET bajo el Proyecto UE N°22920200100035CO, por la ANP-CyT, mediante el Proyecto PICT Serie A 03652 y desarrollado en el marco del proyecto CELESTE, código 23-CLIMAT-01. Se hace una especial mención de agradecimiento al Doctorado en Ciencias Aplicadas Mención Ambiente y Salud, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron a la formulación y planificación del estudio. La preparación del material, así como la recopilación y análisis de datos, fueron llevados a cabo por Camila Ailén Gregorini, María Guadalupe Ares, María Soledad Gualde, Magalí Fornés y Georgina Cazenave. Las figuras y gráficos fueron elaborados por Camila Ailén Gregorini, María Soledad Gualde, Magalí Fornés y María Julia Arrouy. La revisión y edición del manuscrito estuvieron a cargo de Camila Ailén Gregorini, María Guadalupe Ares, María Julia Arrouy y Celio Ignacio Chagas. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing Materials (2007). *ASTM standards related to environmental sampling* (3ª ed.). ASTM International.
- Andreazzini, M. J., Degiovanni, S., Spalletti, P. y Irigoyen, M. (2014). Producción de sedimentos en una cuenca de Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina: estimación para distintos escenarios. *AQUALAC*, 6(1), 38–49. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2014-v6-1-06>
- Ares, M. G., Varni, M., Entraigas, I. y Marzoratti, M. (2007). Uso del suelo y grado de cobertura vegetal en una cuenca del centro de la provincia de Buenos Aires. *Cuadernos del CURIHAM*, 13, 63–69. <https://doi.org/10.35305/curiham.v13i0.83>
- Ares, M. G., Varni, M. y Chagas, C. (2014). Erosión Hídrica En Una Microcuenca Agrícola Bajo Siembra Directa Del Centro De La Provincia De Buenos Aires. *Ciencia del suelo*, 32, 259–270. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/33631>
- Ares, M. G., Bongiorno, F., Holzman, M., Chagas, C., Varni, M. y Entraigas, I. (2016). Water erosion and connectivity analysis during a year with high precipitations in a watershed of Argentina. *Hydrology Research*, 47, 1239–1252. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.179>

- Ares, María Guadalupe, Varni, M. y Chagas, C. (2020). Runoff response of a small agricultural basin in the Argentine Pampas considering connectivity aspects. *Hydrological Processes*, 34(14), 3102–3119. <https://doi.org/10.1002/hyp.13782>
- Ares, M. G., Zabala, M. E., Dietrich, S., Vercelli, N., Entraigas, I., Gregorini, C. A., Marcovecchio, R. y Aispún, Y. (2024). Drainage network dynamics in an agricultural headwater sub-basin. *The Science of the Total Environment*, 914(169826), 169826. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169826>
- Blanco-Canqui, H. y Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management* (1ª ed). Springer Science & Business Media.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Govers, G., Lecomte, V., van Oost, K., Couturier, A., King, C. y Dubreuil, N. (2004). Scale effect on runoff from experimental plots to catchments in agricultural areas in Normandy. *Journal of Hydrology*, 299 (1–2), 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.017>
- Chagas C. I. y Kraemer, F. B. (2023). Degradación de las tierras con énfasis en la región pampeana argentina. En F. B. Kraemer, C. I. Chagas, M. Castiglioni y M. Massobrio (Eds), *Degradación de tierras con énfasis en la Región Pampeana: aportes para una gestión racional del uso agropecuario* (pp. 201–247). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Editorial Facultad de Agronomía.
- Chapman, T. (1999). A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 13(5), 701–714. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1099-1085\(19990415\)13:5](https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1085(19990415)13:5)
- Cingolani, C. A. (2005). Unidades morfoestructurales (y estructuras menores) de la provincia de Buenos Aires. En Etcheverry, R.O., Llambías, M.F., y Caballé, E.J. (Eds.), *Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires* (pp. 21–30). Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino.
- Díaz, S., Pascual, U., Stenseke, M., Martín-López, B., Watson, R. T., Molnár, Z., ... y Shirayama, Y. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359 (6373), 271–272.
- Dingman, S.L. (2015). *Physical hydrology* (3ª ed). Illinois, USA: Waveland Press.
- Gregorini, C.A., Fornés, M., Gualde, M.S., Ríos Hiriart, G., Kuntz, S., Arrouy, M.J. y Ares, M.G. (2024). Aplicación de tomografías de resistividad eléctrica para la caracterización del subsuelo en un ambiente de cabecera de cuenca hidrográfica. *Geoacta* (En prensa).
- Helsel, D. R., Hirsch, R. M., Ryberg, K. R., Archfield, S. A. y Gilroy, E. J. (2019). *Statistical methods in water resources*. En *Techniques and Methods* (2ª ed.). US Geological Survey.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). (1992). *Carta de Suelos de la República Argentina*, Hoja 3760-22, Chillar, 1:50.000. INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Jolliffe, I. T. (2002). *Principal component analysis* (2ª ed). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/b98835>
- Lê, S., Josse, J. y Husson, F. (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of statistical software*, 25, 1–18.
- Li, Z. y Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-science reviews*, 163, 94–117. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004>
- Liu, J., Gao, G., Wang, S., Jiao, L., Wu, X. y Fu, B. (2018). The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics. *Journal of Geographical Sciences*, 28, 59–78.
- MacCallum, R. C., Widaman, K. F., Zhang, S. y Hong, S. (1999). Sample size in factor analysis. *Psychological Methods*, 4 (1), 84–99. <https://doi.org/10.1037/1082-989x.4.1.84>
- Marchese, H. G. y Di Paola, E. (1975). Miogeosinclinal Tandil. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 30 (2), 161–179.
- Minella, J. P. G., Merten, G. H., Schlesner, A., Bernardi, F., de Barros, C. A. P., Tiecher, T., Ramon, R., Evrard, O., dos Santos, D. R., Reichert, J. M. y Tassi, R. (2022). Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring: The “Arvorezinha catchment” experience. *Hydrological Processes*, 36 (9). <https://doi.org/10.1002/hyp.14665>
- Mota, J. R., Rodrigues, J. A. M., de Oliveira, L. F. C. y Viola, M. (2021). Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG). *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 14 (1), 1–14.
- Nágera, J. J. (1940). Tandilia. Biblioteca de la Facultad de Humanas y Ciencias de la Educación. *Universidad Nacional de La Plata*, 24, 1–272.
- Nathan, R. J. y McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses. *Water Re-*

- sources Research*, 26 (7), 1465–1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Oeurng, C., Sauvage, S., y Sánchez-Pérez, J.M. (2010). Dynamics of suspended sediment transport and yield in a large agricultural catchment, southwest France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (11), 1289–1301. <https://doi.org/10.1002/esp.1971>
- Perks, M., Warburton, J. y Bracken, L. (2013). Critical assessment and validation of a time-integrating fluvial suspended sediment sampler. *Hydrological Processes*, 28 (17), 4795–4807. <https://doi.org/10.1002/hyp.9985>
- Phillips, J. M., Russell, M. A. y Walling, D. E. (2000). Time-integrated sampling of fluvial suspended sediment: a simple methodology for small catchments. *Hydrological Processes*, 14 (14), 2589–2602. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14%3C2589::AID-HYP94%3E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14%3C2589::AID-HYP94%3E3.0.CO;2-D)
- Rajbanshi, J. y Bhattacharya, S. (2020). Assessment of soil erosion, sediment yield and basin specific controlling factors using RUSLE-SDR and PLSR approach in Konar river basin, India. *Journal of Hydrology*, 587, 124935.
- Restrepo, J. D., Kjerfve, B., Hermelin, M. y Restrepo, J. C. (2006). Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, 316 (1–4), 213–232. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.002>
- Rodríguez, L. B., Vionnet, C., Parkin, G. y Younger, P. (2000). Aplicación de un método automático para la separación de las componentes del hidrograma. *Actas del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica (Córdoba)*, (pp. 279–286).
- Rodríguez-Blanco, M. L., Taboada-Castro, M. M. y Taboada-Castro, M. T. (2019). An overview of patterns and dynamics of suspended sediment transport in an agroforest headwater system in humid climate: Results from a long-term monitoring. *Science of the Total Environment*, 648, 33–43.
- RStudio Team (2024). RStudio: Desarrollo integrado para R. RStudio, PBC, Boston, MA. URL <http://www.rstudio.com/>
- Schindler Wildhaber, Y., Michel, C., Burkhardt-Holm, P., Bänninger, D. y Alewell, C. (2012). Measurement of spatial and temporal fine sediment dynamics in a small river. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16 (5), 1501–1515. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1501-2012>
- Wei, J.-B., Xiao, D.-N., Zeng, H. y Fu, Y.-K. (2007). Spatial variability of soil properties in relation to land use and topography in a typical small watershed of the black soil region, northeastern China. *Environmental Geology*, 53 (8), 1663–1672. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0773-z>
- Wischmeier W.H. y Smith, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. *Handbook* (537). USDA-ARS.
- Zárate, M. y Mehl A. (2010). Geología y geomorfología de la Cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. En: M. Varni, I. Entraigas y L. Vives (eds.). *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zona de llanuras* (1ª ed, pp. 65–78). Editorial Martín. Mar del Plata, Argentina.
- Zhang, S., Li, Y., Fan, W. y Yi, Y. (2016). Impacts of rainfall, soil type, and land-use change on soil erosion in the liusha river watershed. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22 (4), 04016062. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001479](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001479)