

DEPÓSITO DE SEDIMENTOS EÓLICOS EN UN PARCHE FORESTAL DEL AGROECOSISTEMA DEL SEMIÁRIDO PAMPEANO

Fernando Vecilla ^{1*}, Juan Esteban Panebianco ¹, Rocio Noelia Comas ¹,
Laura Antonela Iturri ¹, Laura Andrea de Oro ¹, Daniel Eduardo Buschiazzi ¹

¹ Instituto de Ciencias de la Tierra y Ambientales de La Pampa. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de La Pampa. Argentina.

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar las tasas de sedimentación (Td) de sedimentos eólicos minerales en un parche de bosque del agroecosistema del semiárido pampeano y analizar la variabilidad estacional de dicha sedimentación. La Td media fue 520,15 kg ha⁻¹ año⁻¹ con alta variabilidad interanual. En primavera-verano, Td fue superior que en otoño-invierno. La temperatura del aire y velocidad media máxima del viento influenciaron de forma más significativa a Td. Sin embargo, la cobertura del suelo y el manejo de los campos agrícolas que rodean al bosque determinarían la producción de sedimentos a partir de la erosión eólica y consecuente sedimentación dentro del bosque. Estos resultados muestran la importancia de mantener los parches de bosques dentro de la matriz agrícola en el semiárido, los cuales retienen sedimentos eólicos que finalmente se depositarían en el suelo forestal, minimizando los impactos negativos que los procesos de erosión eólica tienen en estos ecosistemas.

Palabras clave: Erosión eólica; sedimentación de polvo; región semiárida argentina; dinámica estacional.

DEPOSITION OF AEOLIAN SEDIMENTS IN A FOREST PATCH IN THE SEMI-ARID PAMPAS AGROECOSYSTEM

ABSTRACT

The aim of this study was to assess the deposition rates (Td) of mineral aeolian sediments in a forest patch in the semiarid Pampas agroecosystem and to analyze the seasonal variability of such deposition. The average Td was 520.15 kg ha⁻¹ year⁻¹ with high interannual variability. In spring-summer, Td was higher than in autumn-winter. Air temperature and average maximum wind speed influenced Td more significantly. However, the soil cover and management of the agricultural fields surrounding the forest would determine the production of sediment from wind erosion and consequent deposition within the forest. These results show the importance of maintaining forest patches within the agricultural matrix in the semi-arid environment, since they retain eolian sediments that would eventually be deposited on the forest soil, minimizing the negative impacts of wind erosion processes on these ecosystems.

Keywords: Wind erosion, dust deposition; Argentine semi-arid region; seasonal dynamics.

* Autor de contacto:
ferave85@hotmail.com

Recibido:
09-10-23

Recibido con revisiones:
01-12-23

Aceptado:
03-12-23

INTRODUCCIÓN

La erosión eólica (EE) es considerada como uno de los procesos de degradación del suelo más importantes de la región semiárida central de Argentina. Este proceso implica la movilización, transporte y sedimentación de partículas del suelo en zonas que varían en distancia de la fuente de origen, dependiendo del tama-

ño de las partículas y de las barreras físicas presentes en su trayectoria. Las partículas gruesas ($>100\ \mu\text{m}$) generalmente se transportan a distancias relativamente cortas, mientras que las partículas más finas $<100\ \mu\text{m}$ (polvo) pueden ser transportadas a mayores distancias desde su fuente de origen (Zender et al., 2003). La sedimentación de sedimentos eólicos minerales constituye una importante fuente de nutrientes para el suelo, especialmente en áreas áridas y semiáridas (Aciego et al., 2017).

En la provincia de La Pampa, parte de la región semiárida es un ecosistema heterogéneo en el cual coexisten suelos utilizados para agricultura (matriz, parte dominante del paisaje) con parches de bosque nativo de caldén (Caldenal) que se distribuyen de forma fragmentada en el espacio. Las superficies agrícolas que sufren deflación actúan como fuente de materiales, mientras que los forestales funcionan como destino (Iturri et al., 2016), captando y atrapando sedimentos que se depositan posteriormente en el suelo forestal. Un estudio reciente realizado por Berger et al. (2023) muestra la evolución incipiente de un suelo formado a partir de la sedimentación y acumulación de sedimentos eólicos en el bosque de caldén. Utilizando un indicador cronológico y espacial (una capa de ceniza volcánica intacta depositada hace 90 años), calcularon que la tasa media de sedimentación de materiales eólicos en un parche de bosque de caldén fue de $0,2\ \text{cm}\ \text{año}^{-1}$. Sin embargo, hasta la fecha no se ha cuantificado directamente la sedimentación en el ecosistema del Caldrenal, lo que permitiría determinar la variación anual de la tasa de sedimentación actual en el bosque y correlacionarla con la ocurrida desde la sedimentación de la ceniza volcánica.

Los procesos de EE y emisión de partículas finas a nivel regional dependen en gran medida de las condiciones meteorológicas imperantes en cada estación del año (Avecilla et al., 2017). De Oro & Buschiazzi (2009) determinaron que la velocidad umbral necesaria para iniciar los procesos de EE en esta región cambia en función de la estación del año con una velocidad umbral de $\sim 7\ \text{m}\ \text{s}^{-1}$ ($25\ \text{km}\ \text{h}^{-1}$) para las estaciones más secas y ventosas (primavera-verano) y mayor en las estaciones más húmedas y menos ventosas (otoño-invierno). En general, durante la estación estival (primavera-verano) se registra una mayor ocurrencia de vientos que superan la velocidad umbral, principalmente a partir de ráfagas de viento. Esto, sumado a las condiciones secas preexistentes debido a las bajas precipitaciones del período invernal, incrementa los procesos de EE y la sedimentación de los sedimentos movilizados. En el sector este del Caldrenal, donde la agricultura es predominante y los vientos provienen principalmente del cuadrante norte, se intensifican las labranzas para la implantación de cultivos de verano (Mendez & Buschiazzi, 2010). Parte de estos sedimentos, originados a partir de la EE de suelos agrícolas, sedimentarían en los suelos de los parches de bosque nativo de Caldén. Por lo tanto, se espera que durante el ciclo estival se produzcan pulsos de sedimentación en el bosque.

Los objetivos del estudio fueron determinar: a) las tasas de sedimentación de sedimentos eólicos minerales actuales sobre un parche de bosque de Caldén en el agroecosistema del semiárido pampeano y, b) la variabilidad anual y estacional de dicha sedimentación durante el período de julio de 2019 a julio de 2023.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio y diseño experimental

El estudio se desarrolló en un parche del bosque nativo de *Neltuma caldenia* (Caldén, ex *Prosopis caldenia*) de aproximadamente 60 hectáreas ubicado al norte de la provincia de La Pampa, en cercanías de la localidad de Eduardo Castex ($35^{\circ}48'30.57''\ \text{S}$; $64^{\circ}20'08.35''\ \text{O}$). La dirección dominante del viento en la región es del ENE-NE (Figura 1).

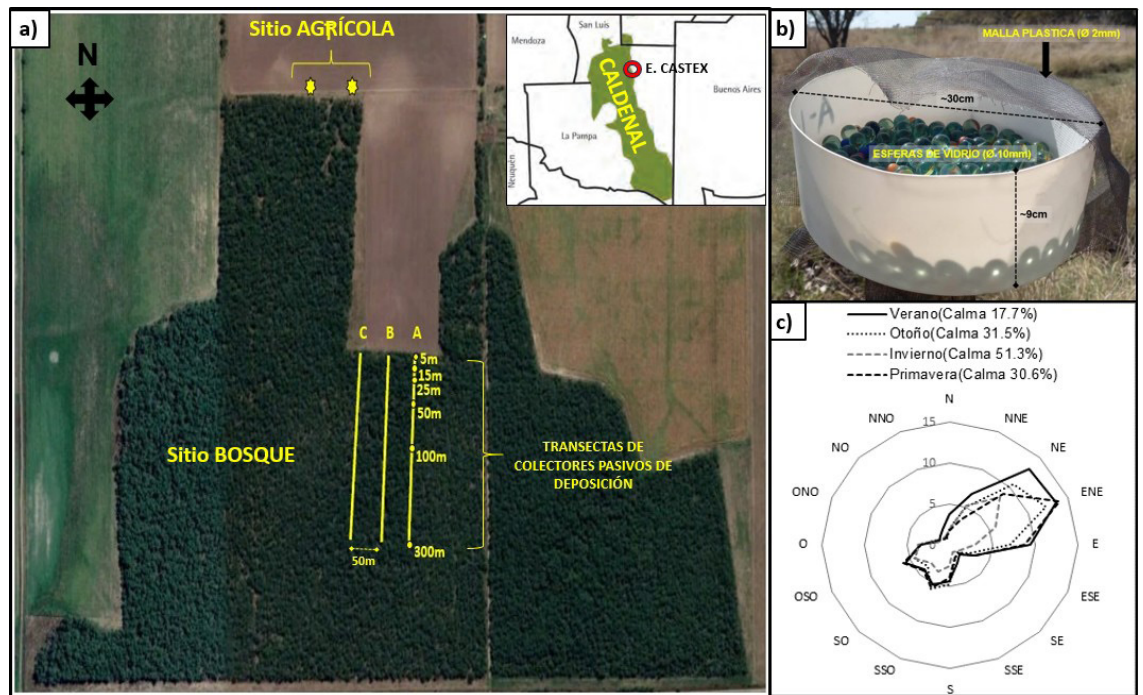


Figura 1: a) Ubicación del parche de bosque de Caldén en el paisaje agrícola. b) Colectores pasivos. c) Dirección dominante del viento en las distintas estaciones del año.

Figure 1: a) Location of the Caldén forest patch in the agricultural landscape. b) Passive collectors. c) Dominant wind direction in the different seasons of the year.

El bosque se encuentra en una zona de transición entre áreas destinadas a la agricultura y a la actividad silvo-pastoril de la región fitogeográfica del Espinal, Distrito de Caldén (Cabrera, 1994). Perteneció a la unidad geomorfológica denominada Unidad Geomorfológica de la Planicie con Tosca (INTA et al., 1980). El suelo forestal contiene 16% de arcilla (<0,002 mm), 72% de limo (0,002-0,053 mm), 12% de arena (0,053-2 mm) y 7,6% de materia orgánica del suelo. El suelo agrícola adyacente corresponde a un *Haplustol Éntico* (Soil Survey Staff, 1999), con una textura Franco Limosa (8% arcilla, 67% limo y 25% arena) y 2,2% de materia orgánica del suelo.

Se realizó un relevamiento forestal en la superficie de bosque de Caldén afectada al estudio con la finalidad de caracterizar la fisonomía del bosque. Se realizó un muestreo de tipo sistemático no estratificado, lo cual implicó una distribución regular, con distancias igualmente distribuidas entre las unidades de muestreo (UM). Se optó realizar un muestreo de este tipo debido a la similitud en los aspectos fisonómicos y edáficos que presentaba el área de bosque a relevar. Se tomaron y georreferenciaron 7 puntos distribuidos uniformemente en la superficie del bosque. Cada punto representó la ubicación de una UM. Cada UM cubrió una superficie de 0,15 hectáreas (1500 m²), las cuales sumadas alcanzaron 1,05 hectáreas relevadas. El total de las UM representaron el 1,75 % de la superficie total del área de la masa forestal (60,2 hectáreas). En cada UM, fueron relevados los siguientes parámetros: especies y densidad de árboles (n° árboles x hectárea), altura media (m) y cobertura del dosel arbóreo (%). A partir del relevamiento forestal se determinó que el parche de bosque está dominado por *Neltuma caldenia* (80%) y en menor medida por *Schinus fasciculatus* (Molle negro), *Geoffroea decorticans* (Chañar) y *Jodina rhombifolia* (Sombra de toro), que cubren menos del 7% de la superficie del suelo. En términos generales, la cobertura arbórea es de aproximadamente 95%, con una altura promedio del estrato arbóreo de aproximadamente 5 metros, aunque alcanzando alturas superiores a 6 metros en el caso de *Neltuma caldenia*. Alrededor del 90% de la cobertura está representada por especies caducifolias (*Neltuma caldenia* y *Geoffroea decorticans*), que estacionalmente aportan material orgánico que se deposita en el suelo forestal.

Para cuantificar la sedimentación de los sedimentos eólicos se instalaron 18 colectores dentro del bosque dispuestos en tres transectas (6 colectores por transecta), espaciadas 50 m entre sí (Sitio BOSQUE). En cada transecta los colectores fueron instalados a 5, 15, 25, 50 100 y 300 m desde el borde con el sitio AGRÍCOLA. Este diseño permitió incluir, por un lado, la mayor sedimentación producida en los primeros metros

dentro del bosque en la zona de borde entre el sitio agrícola y el parche de bosque (a partir de la instalación de colectores a corta distancia entre los puntos al inicio) y por otro, a partir de colectores instalados a mayor distancia entre los puntos, la sedimentación de menor magnitud en función de la distancia creciente dentro del bosque. Además, se instalaron 2 colectores en el lote agrícola colindante (Sitio AGRÍCOLA) (Figura 1a). Para fines estadísticos, las transectas fueron consideradas como repeticiones de muestreo. Se utilizaron colectores pasivos (López García et al., 2013), ubicados a 3 m de altura, debajo de la copa de los árboles. Estos colectores (Figura 1b) consisten en contenedores cilíndricos de plástico con una superficie de muestreo horizontal de 700 cm² que contienen una capa de esferas de vidrio de 10 mm de diámetro para evitar el movimiento turbulento del viento y la eventual pérdida del material recolectado. En la parte superior del colector se colocó una malla plástica de Ø 2 mm para evitar el ingreso de pequeñas ramas, cortezas e insectos. El diseño y ubicación de los colectores pasivos permitió la recolección de sedimentos principalmente por sedimentación vertical (principalmente a partir del transporte por suspensión). Debido a que los colectores estaban ubicados debajo de la copa de los árboles, el material depositado fue principalmente de origen mineral (procedente de la erosión del suelo), y también de origen orgánico (procedente de los árboles). El muestreo abarcó desde julio de 2019 a julio de 2023, realizando un total de veintidós periodos de recolección (cada periodo abarca desde que se instaló el colector hasta que fue retirado) (Tabla 1). Inicialmente el objetivo era recolectar los sedimentos a intervalos de un mes. Sin embargo, debido a los inconvenientes causados por la pandemia COVID19 (restricciones de circulación-movilidad), fue difícil mantener la regularidad de las fechas de recolección, particularmente durante 2020 y 2021. Nótese que en el sitio Agrícola no se muestran las tasas de sedimentación de los tres períodos de muestreo iniciales, debido a problemas en la instalación de los recolectores de sedimentos y recolección de muestras.

Tabla 1: Datos de colección y tasas de sedimentación (Td en g m⁻² d⁻¹) de sedimentos eólicos minerales en el sitio Bosque y el sitio Agrícola.

Table 1: Information collection data and deposition rates (Td in g m⁻² d⁻¹) of mineral eolian sediments at the Forest and Agricultural sites.

Período de muestreo	Año	Datos de colección				Td (g m ⁻² d ⁻¹)	
		Estación	Inicio	Final	Días de colección	Sitio BOSQUE	Sitio AGRÍCOLA
1	2019	INVIERNO	24/07/2019	27/08/2019	33	0,034	
2		INVIERNO	27/08/2019	03/10/2019	37	0,086	
3		PRIMAVERA	03/10/2019	31/10/2019	28	0,048	
4		PRIMAVERA	31/10/2019	28/11/2019	28	0,071	0,073
5		PRIMAVERA	28/11/2019	26/12/2019	27	0,124	0,077
6	2020	VERANO	26/12/2019	27/02/2020	62	0,074	0,060
7		INVIERNO	27/02/2020	12/11/2020	260	0,040	0,060
8	2021	VERANO	12/11/2020	08/02/2021	88	0,273	0,260
9		OTOÑO	08/02/2021	06/04/2021	54	0,061	0,090
10		OTOÑO	06/04/2021	15/06/2021	70	0,198	0,143
11		INVIERNO	15/06/2021	04/10/2021	110	0,080	0,059
12		PRIMAVERA	04/10/2021	21/12/2021	78	0,177	0,096
13	2022	VERANO	21/12/2021	06/07/2022	197	0,101	0,062
14		INVIERNO	06/07/2022	02/09/2022	57	0,076	0,072
15		PRIMAVERA	02/09/2022	13/10/2022	41	0,340	0,095
16		PRIMAVERA	13/10/2022	24/11/2022	42	0,323	0,356
17		PRIMAVERA	24/11/2022	21/12/2022	27	0,260	0,156

18	2023	VERANO	21/12/2022	16/02/2023	57	0,478	0,159
19		VERANO	16/02/2023	03/04/2023	46	0,179	0,488
20		OTOÑO	03/04/2023	10/05/2023	37	0,066	0,112
21		OTOÑO	10/05/2023	16/06/2023	37	0,081	0,136
22		INVIERNO	16/06/2023	28/07/2023	42	0,058	0,076
				PROMEDIO	g m⁻² d⁻¹	0,147	0,138
					kg ha⁻¹ año⁻¹	536,6	503,7

Los datos meteorológicos fueron obtenidos de la estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 ubicada a ~10 km del sitio de estudio, perteneciente a la Red de Estaciones Meteorológicas de la Provincia de La Pampa (Subsecretaría de Asuntos Agrarios, Dirección de Agricultura, Ministerio de la Producción de La Pampa). Las variables meteorológicas utilizadas fueron: temperatura media del aire (T_a , °C), humedad relativa del aire (H_r , %), precipitación (P , mm), evapotranspiración potencial (ETP, mm. Método FAO Penman-Monteith 98), velocidad media del viento (V_m , km h⁻¹) y dirección del viento. Además, se determinó la evapotranspiración real (ETR, mm) mediante un balance de agua del suelo (Thornthwaite – Mather) y la velocidad media máxima del viento ($V_{m(máx)}$, km h⁻¹) para cada mes del periodo de estudio.

Determinación de las tasas de sedimentación (Td).

La tasa de sedimentación por periodo de muestreo (en g m⁻² d⁻¹) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$T_d = (D_p / (0,07) / D_c)$$

donde, T_d es la tasa de sedimentación, D_p es la cantidad de sedimento recolectado (g), 0,07 es el área del colector (m²) y D_c es el número de días del período de recolección.

Para analizar la dinámica anual y estacional de T_d (en el sitio Agrícola y en el sitio Bosque), los períodos de muestreo fueron agrupados en función de los meses de la estación correspondiente (primavera, verano, otoño, invierno; Tabla 1). Las repeticiones son los eventos agrupados por año y por estación, en donde cada uno resultó como el promedio de dos colectores en el sitio Agrícola y dieciocho en el sitio Bosque.

Análisis en laboratorio

Para analizar la masa de sedimento eólico se pesó el material colectado durante cada período de muestreo. Para esto, los colectores se lavaron con agua destilada y se transfirió su contenido a un vaso de precipitado, se estimuló la precipitación de coloides agregando unas gotas de una disolución saturada de MgCl₂. A continuación, se separó el sobrenadante mediante sifón y los restos se secaron a 35 °C para evitar la desnaturalización de los filosilicatos y la descomposición de la materia orgánica. Los sedimentos secos se pesaron con una precisión de 0,0001 g.

Para diferenciar los aportes de minerales de los sedimentos orgánicos (es decir, restos de hojas), los sedimentos secos se colocaron en agua destilada, se agitaron manualmente y se separaron tamizando a través de una malla de 0,5 mm. Esta abertura del tamiz se utilizó ya que es la utilizada para determinar el C orgánico del suelo mediante el conocido método de Walkley & Black (1934), con el fin de separar la fracción ligeramente alterada de residuos orgánicos (>0,5 mm) de la estrechamente relacionada con la fracción mineral (<0,5 mm). A las dos submuestras resultantes: la retenida en el tamiz (predominantemente orgánica) y la separada (predominantemente mineral), se aplicó la metodología ya descrita. Finalmente, se calculó la proporción de la fracción predominantemente mineral, de interés en nuestro estudio.

Análisis estadístico

Las tasas de sedimentación de diferentes años y estaciones se compararon dentro de cada sitio (Bosque y Agrícola) y el promedio de ambos mediante una ANOVA. En caso de existir diferencias se usó la prueba de LSD de Fisher. Se consideró un nivel de significación de 0,1. Con el objetivo de relacionar las tasas de sedimentación y las variables meteorológicas se realizó un análisis de regresión lineal múltiple. Para los análisis estadísticos se utilizó el software INFOSSTAT (Di Rienzo et al., 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2a se muestran las tasas de sedimentación (Td) para los sitios Agrícola y Bosque en los 5 años de estudio. En ambos sitios, se observó una alta variabilidad de Td entre años sin encontrar diferencias estadísticas ($p > 0,05$) entre años. En el sitio Bosque la Td media anual fue de 0,073, 0,057, 0,158, 0,220 y 0,172 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para los años 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023, respectivamente. En el sitio Agrícola la Td media anual fue de 0,075, 0,060, 0,130, 0,148 y 0,194 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ para los años 2019, 2020, 2021, 2022 y 2023, respectivamente. La Td media para todo el período de muestreo, para ambos sitios, fue de $0,143 \pm 0,1 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ($520,15 \pm 361,35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) sin diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$) entre sitios (Agrícola = $0,138 \pm 0,114 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$; Bosque = $0,147 \pm 0,119 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Aunque no se encontraron antecedentes en relación a la medición y cálculo de Td actuales en esta región, la Td media ($52 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$) es similar a las referenciadas en otras regiones de Argentina. Cosentino et al. (2020), reportaron Td medias de $40 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en la región centro norte de la pampa argentina (aproximadamente a 400 km al norte de nuestro sitio de estudio) en un período de 14 años, mientras que Ramsperger et al. (1998) midieron, en diferentes sitios de la región suroeste de la pampa argentina ubicados a aproximadamente 400 km al sur de nuestro sitio de estudio, Td medias entre 37 y $78 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$, durante 3 años de muestreo.

Por otro lado, Tarabini et al. (2019), en un estudio realizado en la Patagonia argentina, encontraron que las plantaciones forestales tuvieron una mayor capacidad de entrapamiento de partículas minerales transportadas por el viento que los pastizales, indicando una mayor efectividad de las coberturas boscosas en la retención de estas partículas. Además, estos autores encontraron que ciertas características de la masa forestal, como el número de árboles por hectárea y la cobertura, correlacionaron positivamente con la capacidad de entrapamiento de partículas minerales. El parche de bosque en el cual se realizó el presente estudio presentó una cobertura del 95%, con lo cual podría esperarse que gran parte del sedimento retenido (colectado) sea finalmente depositado en el suelo forestal.

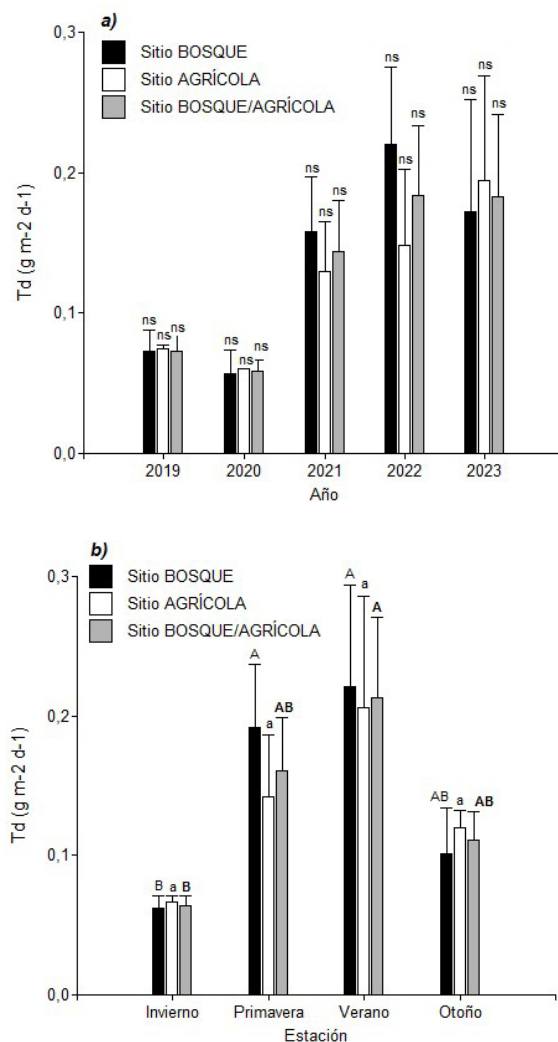


Figura 2: a) Tasa de sedimentación (T_d en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) anual para el período 2019-2023 y b) por estación de sedimentos eólicos minerales en el sitio Bosque, en el sitio Agrícola y para ambos sitios (Sitio BOSQUE/AGRÍCOLA). Letras mayúsculas indican diferencias estadísticas de las T_d entre estaciones para el sitio Bosque, letras minúsculas indican diferencias para el sitio Agrícola y letras mayúsculas en negrita indican diferencias para ambos sitios en conjunto.

Figure 2: a) Annual deposition rate (T_d in $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) for the period 2019-2023 and b) seasonal deposition rate of mineral aeolian sediments at each individual site (Forest site and Agricultural site) and for both sites (FOREST/AGRICULTURAL Site). Capital letters indicate statistical differences of the T_d between stations for the Forest site, lowercase letters indicate differences for the Agricultural site and bold capital letters indicate differences for both sites together.

La Figura 2b muestra la T_d media en las distintas estaciones del año para los sitios Agrícola y Bosque. En el sitio Bosque las T_d fueron ligeramente mayores ($p < 0,05$) para las estaciones primavera y verano en relación a la estación invierno. Para el sitio Agrícola, tales diferencias no se encontraron ($p > 0,05$) debido principalmente a la alta variabilidad de las tasas dentro de las mismas estaciones. Sin embargo, se observó una tendencia de un aumento de T_d en las estaciones de primavera y verano en comparación a las T_d encontradas en otoño e invierno. La T_d media para ambos sitios fue de $0,213 \pm 0,051 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ en verano; $0,167 \pm 0,048 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ en primavera; $0,111 \pm 0,033 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ en otoño; y $0,064 \pm 0,012 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ en invierno. En general, y analizando ambos sitios en conjunto, la T_d media en el período primavera-verano ($0,18 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$; $657 \text{ kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) fue superior que la T_d media en el período otoño-invierno ($0,08 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$; $292 \text{ kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), indicando una estacionalidad marcada en relación al input de sedimentos eólicos dentro del parche forestal. Dicha estacionalidad puede deberse a varios factores, entre ellos los meteorológicos y las condiciones de manejo del suelo en los lotes agrícolas circundantes.

En el área de estudio predominan los cultivos de verano por sobre los de invierno, por lo tanto, las labranzas del suelo para la siembra de los cultivos de verano son más intensas y frecuentes en primavera-verano. Este período coincide con las estaciones más ventosas del año y, en general, es precedido por inviernos secos, por lo cual los valores de velocidad umbral del viento son menores en comparación al período otoño-invernal, en el cual hay una mayor humedad del suelo y humedad del aire y menor ocurrencia de vientos erosivos, incrementando la velocidad umbral y disminuyendo el riesgo de erosión eólica (de Oro & Buschiazzi, 2009). En invierno, aunque el suelo está generalmente seco, la cobertura a partir de los cultivos de invierno (y eventualmente el uso de cultivos de cobertura como barbecho) previenen la erosión eólica. En el lote agrícola adyacente al parche forestal, ubicado al norte del mismo, en general durante el período de muestreo, se realizaron dos ciclos de cultivos anuales. Durante el inicio del otoño, en alguno de los años se realizaron cultivos de pasturas de invierno (centeno, cebada, trébol) para pastoreo (Figura 3a), y a mediados de la primavera, se sembró maíz (Figura 3b). Como se observa en la imagen (Figura 3b, comparación entre las imágenes del 12-11-2020 y 08-02-2021), durante el período comprendido entre la labranza y la emergencia de las plántulas de maíz el suelo permaneció con baja cobertura vegetal, y en consecuencia la erosión eólica y emisión de partículas finas del suelo fueron considerables, lo que puede apreciarse a partir de la alta T_d medidas en dicho período (período de muestreo n° 8, Tabla 1). En algunos de los años no se realizaron cultivos de pasturas invernales, permaneciendo el rastrojo de maíz durante el invierno y comienzos de primavera (Figura 3c).

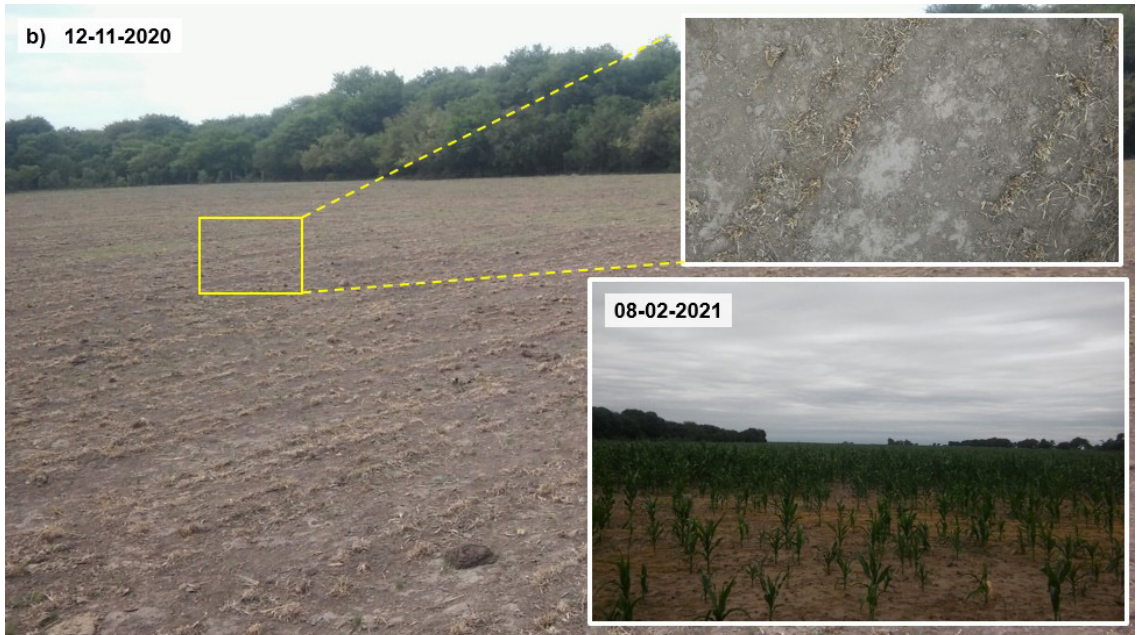




Figura 3: Imagen de la cobertura del suelo del lote agrícola adyacente (Sitio AGRÍCOLA) al parche forestal (Sitio BOSQUE), en distintas estaciones del año.

Figure 3: Image of the soil cover from the adjacent agricultural plot (AGRICULTURAL Site) to the forest patch (FOREST Site) in different seasons of the year.

Los sedimentos depositados en el bosque provendrían tanto de la erosión eólica de los lotes agrícolas cercanos (Berger et al., 2023; Iturri et al., 2016), principalmente ubicados en el cuadrante noreste del sitio de estudio (Figura 1a), como desde fuentes más lejanas. En el período primavera-verano, el 50% de los vientos con $V_{m(max)} > 25 \text{ km h}^{-1}$ (velocidad umbral) provino del cuadrante N-ENE, y el 26% del cuadrante S-OSO, mientras que en otoño-invierno el 54% provino del cuadrante N-ENE y el 30% del cuadrante S-OSO. Sin embargo, y como se observa en la Figura 1c, en primavera-verano los días con calmas sólo representaron el ~24%, en comparación a otoño-invierno que representó el ~41%, indicando que el período estival fue más ventoso. Además, las labranzas del suelo en este período del año se intensifican, dejando más propensa la superficie a ser afectada por los procesos de erosión eólica. La marcada estacionalidad de la sedimentación, mayor en el período estival, fue observada en estudios previos realizados en diversas partes del mundo (Aghasi et al., 2019; Lequy et al., 2013).

Por otro lado, si bien es difícil identificar y separar el aporte de sedimentos depositados provenientes de fuentes locales y de áreas más lejanas, posiblemente en las estaciones de otoño e invierno podría haber un mayor aporte de sedimentos minerales de fuentes más lejanas. Durante otoño-invierno, en general disminuye la labranza y remoción de los suelos agrícolas debido a que una alta proporción de los suelos agrícolas de esta región se destinan a cultivos de verano, excepto en el período entre finales de verano y principios de otoño, en los que parte de los suelos agrícolas se destinan al cultivo de pasturas de invierno. Sin embargo, la remoción y la labranza del suelo son significativamente menores durante las estaciones de otoño e invierno, y los procesos de erosión eólica son menos frecuentes, respecto al período estival. El aporte de sedimentos de fuentes externas sería relativamente constante a lo largo del año. Existe evidencia (Zárate & Tripaldi, 2012; Zárate, 2003) que demuestra que gran parte de los sedimentos que se movilizan a nivel regional provienen de regiones ubicadas al suroeste de la región de estudio, desde el piedemonte andino y el sistema fluvial del río Atuel-Salado-Chadileuvú, e incluso de fuentes ubicadas en la zona central de la diagonal árida sudamericana, como el sector central y sur de la meseta Puna-Altiplano (Cosentino et al. 2020), que presentan características climáticas áridas con déficits hídricos, escasa cobertura vegetal y fuertes vientos durante todo el año. Debido al constante aporte de sedimentos minerales a lo largo del año de fuentes externas y a la menor ocurrencia de eventos de erosión eólica a escala local, es posible que en las estaciones de otoño e invierno el aporte relativo de sedimentos desde fuentes externas sea mayor que en las estaciones de primavera y verano, en las cuales los mayores aportes provendrían de la erosión eólica de los suelos agrícolas a escala local.

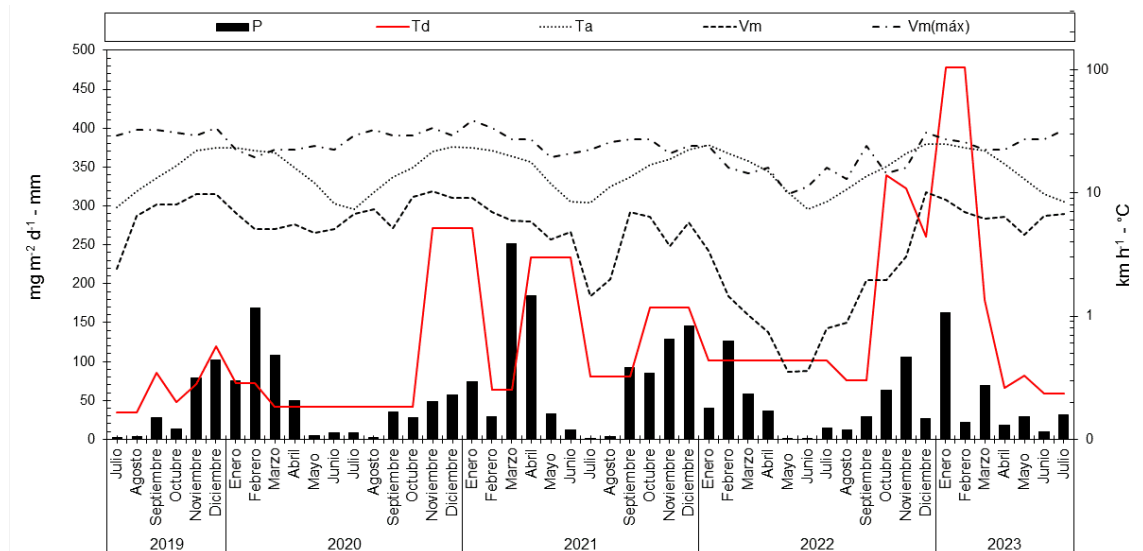


Figura 4: Tasa de sedimentación (Td) y variables meteorológicas (julio 2019 a julio 2023). Td: tasa de sedimentación de sedimentos eólicos minerales ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$), P: precipitaciones (mm), Ta: temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$), Vm: velocidad media del viento (km h^{-1}), $V_{m(\text{máx})}$: velocidad media máxima del viento (km h^{-1}).

Figura 4: Deposition rate (Td) and meteorological variables (July 2019 to July 2023). Td: aeolian sediment deposition rate ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$), P: rainfall (mm), Ta: mean air temperature ($^{\circ}\text{C}$), Vm: average wind speed (km h^{-1}), $V_{m(\text{máx})}$: maximum average wind speed (km h^{-1}).

La relación entre Td en el sitio Bosque y las distintas variables meteorológicas durante el período de estudio se muestran en la Figura 4. Para determinar cuál o cuáles de las variables meteorológicas fueron las que condicionaron de forma más significativa Td se realizó un análisis de regresión múltiple. Se probaron modelos de Td en función de la combinación de las variables meteorológicas (temperatura media del aire (Ta), humedad relativa del aire (Hr), precipitación (P), evapotranspiración potencial (ETP), velocidad media del viento (Vm), evapotranspiración real (ETR) y velocidad media máxima del viento ($V_{m(\text{máx})}$)). En primer lugar, se corrigió una aparente falta de homocedasticidad transformando con raíz cuadrada la variable Td. Se encontró que las variables Ta (temperatura media del aire) y $V_{m(\text{máx})}$ (velocidad media máxima) correlacionaron significativamente ($p < 0,05$) con Td. Por lo cual se realizó el análisis con las variables seleccionadas como predictivas de Td. La regresión fue significativa ($p < 0,05$), y el modelo propuesto logró explicar un 31% ($R^2_{\text{ajustado}} = 0,31$) de la variabilidad ($Td = 10,32 + 0,45 \times Ta - 0,24 \times V_{m(\text{máx})}$).

Como se ha demostrado en estudios previos (Avecilla et al., 2017), y parcialmente en concordancia con lo encontrado en el presente, los procesos de EE y sedimentación, están influenciados en gran medida por las variables meteorológicas Ta y $V_{m(\text{máx})}$. Los resultados indican que el depósito de sedimentos eólicos minerales estaría afectado por múltiples factores, entre los que se encuentran las condiciones meteorológicas imperantes durante el proceso, por la evolución estacional de la cobertura de los suelos agrícolas (dependiente del manejo) a nivel regional, y por la naturaleza caduca del estrato arbóreo dominante del parche de bosque, que posiblemente afecte la capacidad de retención de los sedimentos durante las distintas estaciones del año.

CONCLUSIONES

El estudio tuvo como objetivo determinar las tasas de sedimentación (Td) de sedimentos eólicos minerales en un parche de bosque nativo del agroecosistema del semiárido pampeano, durante 5 años. La Td media fue $0,143 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($520,15 \pm 361,35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) con variaciones estacionales marcadas. En el período primavera-verano la Td fue superior ($657 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) a la Td en el período otoño-invierno ($292 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Las variables meteorológicas que influenciaron de forma más significativa a Td fueron la temperatura del aire y la velocidad media máxima del viento. Sin embargo, estas variables sólo explicaron el $\sim 30\%$ de la variabilidad, indicando que otros factores como la cobertura del suelo y el manejo de los campos agrícolas que rodean al parche de bosque determinarían la producción de sedimentos a partir de la erosión eólica y consecuente sedimentación dentro del bosque. Estos resultados muestran la importancia de mantener los

parches de bosques dentro de la matriz agrícola en el semiárido, los cuales retienen sedimentos eólicos que finalmente se depositarían en el suelo forestal, minimizando los impactos negativos que los procesos de erosión eólica tienen en estos ecosistemas. Es necesario continuar con estudios que permitan profundizar en la comprensión de la dinámica de los procesos fuente/sumidero de los sedimentos originados por erosión eólica en el agroecosistema semiárido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Sr. Hugo Capello por facilitar el acceso al sitio de estudio. Este estudio estuvo financiado por los proyectos PIP 2021-2023 (CONICET), PICT 2020 N° 03321 (ANPCyT-CONICET), I-158/19 (FA-UNLPam), y subsidio de la Dirección de Recursos Naturales (Ministerio de Producción) de la Provincia de La Pampa.

REFERENCIAS

- Aciego, S. M., Riebe, C. S., Hart, S. C., Blakowski, M. A., Carey, C. J., Aarons, S. M., Dove, N. C., Botthoff, J. K., Sims K. W. W. & Aronson, E. L. (2017). Dust outpaces bedrock in nutrient supply to montane forest ecosystems. *Nature Communications*, 8:14800. <https://doi.org/10.1038/ncomms14800>
- Aghasi, B., Jalalian, A., Khademi, H. & Besalatpour, A. A. (2019). Relationship between dust deposition rate and soil characteristics in an arid region of Iran. *Atmósfera* 32(2), 115-128. <https://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.02.03>
- Avecilla, F., Panebianco, J. E. & Buschiazzo, D. E. (2017). Meteorological conditions during dust (PM10) emission from a tilled loam soil: identifying variables and thresholds. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244, 21-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.05.016>
- Berger, M. G., Iturri, L. A. y Buschiazzo, D. E. (2023). Evolución del suelo en sedimentos eólicos de depositación reciente en el semiárido. Efectos de espesores variables. *Ciencia Del Suelo*, 41 (1), 116-122. <https://ojs.suelos.org.ar/index.php/cds/article/view/769>
- Cabrera, L. A. (1994). *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Regiones Fitogeográficas Argentinas*. (pp. 36-42). Editorial Acme.
- Cosentino, N. J., Gaiero, D. M., Torre, G., Pasquini, A. I., Coppo, R., Arce, J. M. & Vélez, G. (2020). Atmospheric dust dynamics in southern South America: A 14-year modern dust record in the loessic Pampean region. *The Holocene*, 30(4), 575-588. <https://doi.org/10.1177/0959683619875198>
- de Oro, L. A. & Buschiazzo, D. E. (2009). Threshold wind velocity as an index of soil susceptibility to wind erosion under variable climatic conditions. *Land Degradation & Development*, 20, 14-21. <https://doi.org/10.1002/ldr.863>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2002). InfoStat versión 1.1. FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- INTA, Gobierno de la Provincia de La Pampa y UNLPam. (1980). *Inventario Integrado de los recursos naturales de la Provincia de la Pampa*. Ediciones INTA.
- Iturri, L. A., Avecilla, F., Hevia, G. G. & Buschiazzo, D. E. (2016). Comparing adjacent cultivated- and "virgin" soils in wind erosion affected environments can lead to errors in measuring soil degradation. *Geoderma*, 264, 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.017>
- Lequy, E., Legout, A., Conil, S. & Turpault, M. P. (2013). Aeolian dust deposition rates in Northern French forests and inputs to their biogeochemical cycles. *Atmospheric Environment*, 80, 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.075>
- López-García P., Gelado-Caballero M. D., Santana-Castellano D., Suárez de Tangil M., Collado- Sánchez C. & Hernández-Brito, J. J. (2013). A three-year time-series of dust deposition flux measurements in Gran Canaria, Spain: A comparison of wet and dry surface deposition samplers. *Atmospheric Environment*, 79, 689-694. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.044>
- Mendez, M. J. & Buschiazzo, D. E. (2010). Wind erosion risk in agricultural soils under different tillage systems in the semiarid pampa of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 106, 311-316. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.10.010>
- Ramsperger, B., Peinemann, N. & Stahr, K. (1998). Deposition rates and characteristics of aeolian dust in the semi-arid and sub-humid regions of the Argentinean Pampa. *Journal of Arid Environment*, 39 (3), 467-476. <https://doi.org/10.1006/jare.1997.0366>
- Subsecretaría de Asuntos Agrarios, Dirección de Agricultura, Ministerio de la Producción de La Pampa. <https://lapampa.redesclimaticas.com/>
- Soil Survey Staff, (1999). *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. U.S. Government Printing Office, Washington.
- Tarabini, M., Gomez, F. y La Manna, L. (2019). Ceniza volcánica reciente como indicadora de retención de partículas en los suelos de la Patagonia andina. *Ciencia del Suelo*, 37(1), 101-112.
- Walkley, A. & Black, I.A. (1934). An Examination of the Degtjareff Method for Determining Soil Organic Matter and a Proposed Modification of the Chromic Acid Titration Method. *Soil Science*, 37, 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Zárate, M.A. & Tripaldi, A. (2012). The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Res.* 3, 401-417.

Zárate, M.A. (2003). Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews* 22, 1987–2006.

Zender, C. S., Bian, H. S. & Newman, D. (2003). Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: description and 1990s dust climatology. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108: 4416. <https://doi.org/10.1029/2002JD002775>