



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias



CALIDAD DEL MATERIAL EROSIONADO POR EL VIENTO EN SUELOS DE ARGENTINA

Silvia Beatriz Aimar

Tesis

Para optar al Grado Académico de

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Córdoba, 2016

CALIDAD DEL MATERIAL EROSIONADO POR EL VIENTO EN SUELOS DE ARGENTINA

Silvia Beatriz Aimar

Comisión Asesora de Tesis

Director: Dr. Daniel Eduardo Buschiazzo

Asesores: Dr. Omar Bachmeier

Dr. Diego Gaiero

Tribunal Examinador de Tesis

Dr. César Mario Rostagno

Dr. Eduardo M. Zamora

Dr. Omar Bachmeier

Presentación formal académica

22 de agosto de 2016

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento al Dr. Daniel Buschiazzo, por tener siempre buena predisposición, por su dirección, asistencia y corrección de esta tesis. Agradezco también a la Comisión Asesora de Tesis, al Dr. Omar Bachmeier y Dr. Diego Gaiero.

Un muy especial agradecimiento a las Estaciones Experimentales de INTA, donde se instalaron las parcelas de medición y todas las personas que me asistieron con los trabajos de campo, a la MSc. Julieta Rojas, Ing. Graciela Guevara, Srta. Noelia Zuk, Ing. Eduardo Ochner, Dr. Juan Cruz Colazo, MSc. Paula Hurtado, Dr. Donaldo Brand, MSc. Diego Celdran, Ing. Daniel Omar Granado, Ing. Paloma Magraht y al Ing Gervasio Humano.

Un especial agradecimiento también al Dr. Roger Funk y al Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF) de Müncheberg (Alemania), donde desarrollé parte de la tesis utilizando el túnel de viento y laboratorios del Instituto.

Agradezco a mis compañeros de trabajos, por las horas compartidas y muy especialmente al Dr. Mariano J. Méndez, por acompañarme en algunos viajes a las parcelas y por su importante aporte en algunos temas de la tesis.

Quiero expresar también mi sincero agradecimiento al Sr. Abel Parodi y a la Dra. Antonela Iturri por la ayuda al momento de hacer los trabajos de laboratorio y a la Dra. Graciela Visconti por la ayuda con el trabajo al microscopio.

Agradezco también el apoyo recibido por parte de las autoridades de la Facultad de Agronomía, Dr. Gustavo Fernandez, Lic. Ana Urioste y Dr. Ernesto Morici y de la Universidad Nacional de La Pampa, Dra. María Silvia Di Liscia.

Finalmente, quiero agradecer muy especialmente a mi familia por el estímulo y apoyo permanente, a mis hijas Daniela, Pierina y Graciana, a mi esposo Fredi y a mi mamá Elsa.

DEDICATORIA

A mis hijas Daniela, Pierina y Graciana

A mi nieta Antonia

RESUMEN

La erosión eólica es un importante proceso de degradación de suelos de ambientes áridos y semiáridos del mundo, sobre cuyas magnitudes, y particularmente su calidad, existe poca información. Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue determinar la cantidad y la calidad de los materiales erosionados por el viento, en suelos de ambientes semiáridos de Argentina desarrollados sobre distintos materiales parentales. Se midió la erosión a campo en siete sitios con suelos desarrollados sobre: a) loess (Ls); b) arenas eólicas (Ar) y c) sedimentos terciarios, (Tc). Se midieron entre 5 y 138 tormentas, recolectándose el material erosionado con colectores BSNE ubicados a 13.5, 50 y 150 cm de altura. Se pudo comprobar que los suelos de Ls y Ar presentaron mayores erosiones (valores máximos de entre 25 y 27 Mg.ha⁻¹.año⁻¹) que los de Tc. Aunque los suelos de Tc se encuentran en regiones de mayor erosividad climática (Patagonia y Altiplano), se erosionaron menos debido a la cobertura con vegetación natural y a su menor susceptibilidad a erosionarse. La proporción de material movilizado cerca de la superficie del suelo, en relación al movilizado a mayor altura, fue mayor en los suelos de Ls y Ar que en los de Tc. El material erosionado estuvo enriquecido en partículas de tamaño limo y arena muy fina en Ls y Ar y, además, en arena fina en Tc. La emisión de partículas finas a la atmósfera (PM₁₀), que se realiza mayormente a partir de material transportado a mayor altura fue, sin embargo, mayor en Ls debido a la mayor masa total de material erosionado y a su mayor capacidad de emitir PM₁₀. La concentración de la mayoría de los elementos analizados en el material erosionado fue superior a la del suelo original en todos los sitios y se incrementó con la altura, en la mayoría de los eventos erosivos, la concentración. Las pérdidas absolutas de todos los elementos fueron mayores en Ls, intermedias en Ar y menores en Tc. Se pudo concluir que los suelos de Ls, a pesar de producir materiales erosionados con menores concentraciones en elementos que los de Tc, presentan, potencialmente, mayores tendencias a perder cantidades absolutas más elevadas debido a sus mayores tasas de erosión. Esto involucra efectos más negativos tanto sobre la calidad de los suelos erosionados como sobre el ecosistema, particularmente a través de la mayor emisión PM₁₀ a la atmósfera.

Palabras claves: erosión eólica, ambientes semiáridos, calidad de la erosión, degradación de suelos, pérdida de nutrientes, material particulado.

ABSTRACT

Wind erosion is a major degradation of soils of arid and semi-arid of the world, whose magnitudes, and in particular its quality, there is little information. Therefore, the aim of this study was to determine the quantity and quality of materials eroded by wind in semiarid environments of Argentina, in soils developed on different parent materials. Wind erosion was measured in seven soils developed on material: a) loess (Ls); b) aeolian sands (Ar) and c) Tertiary sediments (Tc). They were measured between 5 and 138 storms, collecting the material eroded with BSNE collectors located at 13.5, 50 and 150 cm. It was found that Ar and Ls soils had higher erosions (maximum values of between 25 and 27 Mg.ha⁻¹.year⁻¹) than Tc. Although Tc soils are found in regions of increased climate erosivity (Patagonia and Altiplano) were eroded less due to natural vegetation coverage and lower susceptibility to erosion of soils. The proportion of material mobilized near the soil surface, in relation to mobilized higher, was higher in Ar and Ls soils than in the Tc soils. The eroded material in Ls and Ar was enriched in silt and very fine sand sized particles and too in fine sand in Tc. Emission to the atmosphere of fine particle (PM₁₀), performed mostly from the particle transported more height was, however, higher in Ls due to the greater total mass of eroded material and to its greater ability to emit PM₁₀. The concentration of most of the elements discussed eroded material was higher than the original soil in all sites and was increased to height, in most erosive events, the concentration. The absolute losses of all elements were higher in Ls, intermediate Ar and lower in Tc. It was concluded that, Ls soils, despite producing eroded material with lower concentrations of elements than Tc, they have potentially major trends lose highest absolute amount, due to their higher rates of erosion. This involves much more negative effects on the quality of soils eroded as on the ecosystem, particularly through the increased emission to air PM₁₀ soils.

Keywords: wind erosion, semiarid environments, erosion quality, land degradation, loss of nutrients, particulate material.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	1
CONSIDERACIONES GENERALES	1
MECANICA DEL PROCESO EROSIVO	3
CALIDAD DEL MATERIAL EROSIONADO POR EL VIENTO	9
Granulometría del material erosionado	10
Emisión de partículas finas (PM ₁₀)	13
Composición química del material erosionado	15
HIPOTESIS	19
OBJETIVO PRINCIPAL	20
Objetivos específicos	20
MATERIALES Y METODOS	21
CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO	21
SITIOS DE MUESTREO	24
DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS MUESTREOS	26
Colectores de partículas	29
Recolección de muestras	31
METODOS ANALÍTICOS	32
Análisis del material erosionado	32
<u>Análisis físicos</u>	32
<u>Análisis químicos</u>	32
Análisis del suelo original	33
<u>Análisis físicos</u>	33
<u>Análisis químicos</u>	33
<u>Tasa de Enriquecimiento</u>	33
<u>Análisis mineralógico</u>	34
<u>Grado de Cobertura</u>	34
<u>Caracterización de la vegetación</u>	35
<u>Erosividad climática</u>	36
Análisis de emisión de PM ₁₀	36
<u>Análisis morfológico de partículas PM₁₀</u>	39
Distribución de las partículas en el túnel de viento	40

Análisis de los resultados	41
RESULTADOS Y DISCUSION	42
MAGNITUD DE LA EROSION EN LOS SITIOS DE MUESTREO	42
Relación entre magnitud de la erosión y parámetros climáticos	48
Material erosionado sobre la superficie del suelo	51
GRANULOMETRIA DEL MATERIAL	53
Granulometría del material erosionado	53
Distribución del material erosionado en el espacio	63
Emisión potencial de partículas finas (PM ₁₀)	71
MINERALOGIA DE LOS SUELOS Y DEL MATERIAL EROSIONADO	79
Estado de agregación y mineralogía de la fracción de 50 a 74 µm	79
Morfología del material particulado (PM ₁₀)	81
COMPOSICION QUIMICA DEL MATERIAL EROSIONADO	89
Distribución de elementos en agregados	103
Relación entre concentración de elementos y parámetros climáticos	108
CONCLUSIONES	113
Futuras líneas de investigación	115
BIBLIOGRAFIA CITADA	117
ANEXOS	132
ANEXO 1 Cantidades erosionadas y parámetros climáticos de los eventos erosivos analizados en los sitios de estudio.	132
ANEXO 2 Peso del material erosionado en el colector a sotavento (a los 13,5, 50 y 150 cm de altura), flujo de masa (FM) y parámetros de la función utilizada, para los eventos erosivos de los sitios estudiados.	145
ANEXO 3 Análisis granulométrico de las muestras recolectadas a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en los eventos erosivos de los sitios estudiados.	153
ANEXO 4 Fracciones texturales en las muestras sin dispersar sedimentadas a lo largo del túnel de viento.	158
ANEXO 5 Elementos totales en muestras del suelo original y en el material erosionado.	162

ANEXO 6 Parámetros de regresiones simples y múltiples entre la concentración de elementos y parámetros climáticos. 167

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Ubicación geográfica y geomorfología, clasificación y principales propiedades de los suelos (textura, clase textural y MO) de los sitios estudiados (Los Frentones, Santa Rosa, Anguil, Villa Mercedes, Abra Pampa, Pilcaniyeu, Río Mayo y Potrok Aike).

Tabla 3.1. Características climáticas de los sitios estudiados.

Tabla 3.2. Porcentaje de la superficie del suelo cubierta con vegetación natural y con rodados en Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Tabla 3.3. Cantidades erosionadas, parámetros climáticos y flujo de masa de 0 a 150 y de 13,5 a 150 cm de altura de los eventos erosivos seleccionados de los sitios de estudio.

Tabla 3.4. Ecuaciones y coeficientes de correlación lineal entre la proporción de diferentes fracciones granulométricas en el material erosionado y la velocidad máxima en período de excedencia.

Tabla 3.5. Ecuaciones y coeficientes de la relación lineal entre la emisión de PM_{10} y la humedad del suelo.

Tabla 3.6. Ecuaciones de regresión múltiple entre las concentraciones de elementos en el material erosionado a distintas alturas, para todos los sitios, y parámetros climáticos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Representación del perfil de viento y de los movimientos de rodadura, saltación y suspensión.

Figura 2.1. Mapa con la localización de los suelos estudiados: Abra Pampa (AP), Los Frentones (LF), Villa Mercedes (VM), Santa Rosa (SR), Anguil (AN), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Figura 2.2 a) Vista general de los sitios de muestreo A) Santa Rosa, B) Los Frentones, C) Villa Mercedes, D) Abra Pampa, E) Pilcaniyeu, F) Río Mayo y G) Potrok Aike.

Figura 2.3. Vista de la estación meteorológica portátil y sus componentes.

Figura 2.4. A) Estructura del colector BSNE, B) Detalle de la abertura y C) Ubicación de los colectores BSNE en cada mástil.

Figura 2.5. Ubicación de los mástiles con colectores y la estación meteorológica en la parcela.

Figura 2.6. Parcela de Potrok Aike, analizada con la cuadrícula del programa Paint Shop Pro 7.

Figura 2.7. Vista general del túnel de viento del Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Müncheberg, Alemania.

Figura 3.1. Material erosionado (Q) por evento erosivo en los sitios de estudio.

Figura 3.2. Proporción de material erosionado a las alturas de 13,5, 50 y 150 cm, en los sitios estudiados.

Figura 3.3. Proporción de material erosionado a 50 y 150 cm de altura en relación al porcentaje de cobertura de los suelos Tc.

Figura 3.4. Relación entre material erosionado (kg ha^{-1}) y velocidad máxima en período de excedencia (km h^{-1}), para las tormentas seleccionadas de los suelos A) arenoso y loésicos y B) terciarios.

Figura 3.5. Porcentaje de material erosionado entre 0 y 13,5 cm de altura en los sitios Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Potrok Aike (PA), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Figura 3.6. Composición granulométrica del material erosionado a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en eventos erosivos de suelos desarrollados sobre loess: A) Santa Rosa, B) Los Frentones y sobre arenas eólicas C) Villa Mercedes.

Figura 3.7. Composición granulométrica del material erosionado a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en eventos erosivos de suelos desarrollados sobre materiales terciarios: A) Abra Pampa, B) Pilcaniyeu y C) Río Mayo.

Figura 3.8. Curvas acumulativas de las fracciones texturales del suelo original y del material erosionado a los 13,5, 50 y 150 cm de altura, en los sitios A) Santa Rosa, B) Los Frentones, C) Villa Mercedes, D) Abra Pampa, E) Pilcaniyeu y F) Río Mayo.

Figura 3.9. Tasas de enriquecimiento (porcentaje de partículas de una fracción granulométrica en el material colectado, respecto al porcentaje de la misma fracción en el suelo original) a los 13,5, 50 y 150 cm de altura, en los sitios A) Santa Rosa, B) Los Frentones, C) Villa Mercedes, D) Abra Pampa, E) Pilcaniyeu y F) Río Mayo.

Figura 3.10. Proporción de material sedimentado en un túnel de viento en función de la distancia para suelos de Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Figura 3.11. A) Vista general de la deposición de partículas a través del túnel de viento, B) detalle de la deposición.

Figura 3.12. Análisis granulométrico de los suelos correspondientes a Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Figura 3.13. Curvas acumulativas de la distribución del tamaño de partículas determinadas con y sin dispersión, para los suelos de Santa Rosa, Los Frentones, Anguil, Villa Mercedes, Abra Pampa, Pilcaniyeu, Río Mayo y Potrok Aike.

Figura 3.14. Proporción de fracciones texturales en muestras sin dispersar, sedimentadas a lo largo del túnel de viento, para los suelos de Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Figura 3.15. Contenido de limo en el material sedimentado a lo largo del túnel de viento, para los suelos de a) Santa Rosa (SR), b) Los Frentones (LF), Anguil (AN) y Villa Mercedes (VM) y c) Pilcaniyeu (PC), Abra Pampa (AP), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Figura 3.16. Relación entre la emisión de PM_{10} y la humedad del suelo para los suelos de Santa Rosa (SR), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Figura 3.17. Relación entre el coeficiente b de la regresión entre la emisión de PM_{10} y la humedad del suelo, y el cociente MO/limo.

Figura 3.18. Relación entre la máxima emisión de PM_{10} y el cociente entre el limo y $1+MO$, para los suelos estudiados.

Figura 3.19. A) Vista general de la mineralogía del suelo de Abra Pampa (AP), B) lúlicos volcánicos (AP) y C) Mica azul (AP), D) vista general del suelo de Pilcaniyeu (PC), E) lúlicos volcánicos (PC) y F) vidrio fluidal alterado (PC).

Figura 3.20. A) Vista general de la mineralogía del suelo de Río Mayo (RM), B y C) Detalle de lúlicos volcánicos de RM, D y E) Detalle de minerales y agregados (Agg) en Potrok Aike (PA), F) Detalle de cuarzos en PA.

Figura 3.21: A) vista general de la mineralogía del suelo de Villa Mercedes (VM), B) hornblenda común (VM), C) vidrio fluidal (VM), D) vista general de Los Frentones (LF), E) hipersteno y cuarzo (LF) y F) hornblenda alterada y opaco.

Figura 3.22: A) Vista general de la mineralogía del suelo de Santa Rosa (SR), B) agregados (SR), C) vidrio volcánico y agregado (SR), D) vista general de Anguil (AN), E) hipersteno y F) hornblenda (AN).

Figura 3.23. A) Vista general y B) detalles de las PM_{10} de Abra Pampa, C) vista general y D) detalles de las PM_{10} de Pilcaniyeu, E) vista general y F) detalles de las PM_{10} de Río Mayo.

Figura 3.24. A) Vista general y B, C y D) detalles de las PM_{10} de Potrok Aike, E) vista general y F) detalles de las PM_{10} de Villa Mercedes (VM).

Figura 3.25. A) Vista general y B) detalles de las PM_{10} de Los Frentones, C) vista general y D) detalles de las PM_{10} de Santa Rosa, E) vista general y F) detalle de las PM_{10} de Anguil.

Figura 3.26. Concentración de A) carbono y B) nitrógeno en el material colectado a distintas alturas, en Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Figura 3.27. Aspecto general de la muestra transportada a los 13,5 cm de altura en A) Abra Pampa, B) Pilcaniyeru, C) Los Frentones y D) Santa Rosa.

Figura 3.28. Tasa de enriquecimiento del material erosionado respecto al suelo original de A) carbono y B) nitrógeno para los sitios Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Figura 3.29. Tasa de enriquecimiento de C en el material erosionado en el año 1995 y 2009 en Santa Rosa.

Figura 3.30. Concentración de A) fósforo, B) azufre, C) calcio, D) magnesio y E) potasio, en el material erosionado a distintas alturas de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Figura 3.31. Tasa de enriquecimiento del material erosionado respecto al suelo original de A) fósforo, B) azufre y C) calcio, D) magnesio y E) potasio para los sitios Los Frentones (LF),

Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Figura 3.32. Concentración de A) hierro, B) manganeso, C) zinc y D) cobre, en el material erosionado a distintas alturas de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Figura 3.33. Tasa de enriquecimiento del material erosionado respecto al suelo original de A) hierro, B) manganeso, C) cobre y D) zinc, para los sitios Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Figura 3.34. Concentración de A) carbono, B) nitrógeno, C) fósforo y D) azufre en los agregados de los suelos de Santa Rosa, (SR) y Río Mayo (RM).

Figura 3.35. Relación entre elementos en el material erosionado en todos los sitios estudiados, A) nitrógeno y carbono, B) hierro y manganeso, C) cobre y zinc.

Figura 3.36. Relación entre concentración de C y duración de las tormentas, a los 13,5 y 150 cm de altura para todos los sitios.

LISTA DE ABREVIATURAS Y/O SIMBOLOS

AP: Abra Pampa.
Ar: Arenosos.
CG: Cámara generadora de polvo.
CHU: Contenido de humedad umbral.
CO: Carbono orgánico.
CP: Cámara de concentración de polvo.
EE: Erosión eólica.
FH: Flujo horizontal.
FM₀₋₁₅₀: Flujo de masa de 0 a 150 cm de altura.
FM_{13.5-150}: Flujo de masa de 13.5 a 150 cm de altura.
FV: Flujo vertical.
LF: Los Frentones.
Ls: Loésicos.
MO: Materia orgánica.
PA: Potrok Aike.
PC: Pilcaniyeu.
PM₁₀: Partículas de tamaño menor a 10 µm de diámetro.
Q: Material erosionado.
RM: Río Mayo.
RSPC: Región Semiárida Pampeana Central.
S105: Suelo secado en estufa a 105 °C.
S60: Suelo secado en estufa a 60 °C.
S40: Suelo secado en estufa a 40 °C.
SA: suelo secado al aire.
SH: Suelo húmedo.
SR: Santa Rosa.
T1: Tramo del túnel de viento de 0 a 130 cm de longitud.
T2: Tramo del túnel de viento de 130 a 260 cm de longitud.
T3: Tramo del túnel de viento de 260 a 390 cm de longitud.
T4: Tramo del túnel de viento de 390 a 520 cm de longitud.
T5: Tramo del túnel de viento de 520 a 650 cm de longitud.
T6: Tramo del túnel de viento de 650 a 800 cm de longitud.
TA: Todas las alturas.
Tc: Terciarios.
TE: Tasa de enriquecimiento.
TS: Todos los suelos.
VM: Villa Mercedes.
VMaPE: Velocidad máxima en periodo de excedencia.
VmPE: Velocidad media en periodo de excedencia.
Vp: Velocidad de viento promedio.

INTRODUCCION

CONSIDERACIONES GENERALES

En las últimas décadas, el explosivo crecimiento demográfico ha provocado un incremento de las necesidades alimenticias de la población, lo que ha producido una mayor presión productiva de todos los ecosistemas (Thiombiano, 2000). Esta intensificación se ha llevado a cabo en ambientes áridos y semiáridos mediante el desmonte y la roturación de suelos con altas susceptibilidades a ser erosionados por viento y agua, poniendo en peligro la sustentabilidad.

La erosión eólica (EE) es uno de los procesos de degradación de suelos más importantes en ecosistemas secos (Peterson *et al.*, 2006, Buschiazzo, 2006), y tiene efecto sobre procesos como la desertificación y el cambio climático (Nicholson, 2000).

Se puede definir a la EE como el evento que produce la remoción del material superficial, la selección y el transporte por medio del viento. La EE es un proceso geológico normal en la evolución de un paisaje que no se restringe a determinados tipos de suelos o climas. Sin embargo, en algunos sectores de la tierra, como en las regiones áridas y semiáridas, adquiere mayores magnitudes.

Se estima que aproximadamente el 30 % de la superficie del planeta se encuentra afectada por erosión acelerada, desencadenada por el hombre (Lal, 1991). La erosión antrópica es 2,5 veces mayor que la natural o geológica y alcanza magnitudes de 26 billones de toneladas de suelo por año a nivel mundial. A modo de ejemplo, en el año 2000 se determinó que en China una superficie de 1,91 millones de km², cerca del 20 %, del total estuvo afectada por erosión eólica. Williams and Balling (1996), en tanto, determinaron que en África 332 millones de has están sujetas a EE.

Argentina es el país con la octava superficie mundial (2780000 km²) y posee un 75 % de su superficie en regiones áridas y semiáridas, muy vulnerables a la erosión acelerada (Buschiazzo, 2006). Las tormentas de polvo se intensificaron en las últimas cinco décadas

como consecuencia de la intensificación del área cultivada, el sobre pastoreo y prácticas que dejan el suelo sin cobertura vegetal (Wang *et al.*, 2006). Es difícil relacionar la degradación del suelo con el proceso de EE, ya que un suelo puede perder hasta 40 Mg ha⁻¹ anuales sin indicadores visibles de movimiento de suelo (Chepil, 1960).

La magnitud de la erosión ha sido medida muy frecuentemente, con el uso de colectores de partículas o mediante cálculos con ecuaciones validadas. Así se conocen las pérdidas de suelo por erosión eólica a nivel global (Shao *et al.*, 2011), en China (Hoffmann *et al.*, 2011; Lui *et al.*, 2007), Estados Unidos (Zobeck *et al.*, 2013), España (López *et al.*, 2001), Alemania (Funk *et al.*, 2004), Australia (Shao and Leslie, 1997), Nigeria (Chapell *et al.*, 1998), entre otros. En Argentina, se midieron pérdidas de suelo de hasta 40 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en un Haplustol Entico y de hasta 270 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en un Ustipsammente Típico de la Región Semiárida Pampeana Central (RSPC). Estas pérdidas produjeron una reducción del espesor del horizonte A de 0,31 y 2,13 cm en ambos suelos respectivamente (Aimar *et al.*, 2003; Aimar *et al.*, 2011).

La erodabilidad de los suelos es principalmente atribuida a su textura y contenido en materia orgánica (MO) que determinarán la capacidad del suelo de formar agregados o costras (Chepil y Woodruff, 1961). En general suelos arenosos son altamente susceptibles a ser erosionados por su baja capacidad para retener agua, y presencia de agregados débiles, características conferidas por poseer alto contenido de partículas de 80 a 200 µm de diámetro. En tanto suelos francos son menos erosionables, pero poseen un gran potencial de producir polvo atmosférico si es erosionado, a partir del rompimiento de agregados. En la RSPC un 3% de MO en el horizonte A, resulta un valor crítico por debajo del cual se incrementa la susceptibilidad del suelo a erosionarse. Se ha comprobado que además de la MO, los contenidos de arcilla y algunos cementantes inorgánicos con altos contenidos de aluminio, también afectaría la estabilidad de los agregados y por ende la susceptibilidad a degradarse (Buschiazzo *et al.*, 1995; Buschiazzo, 2006).

El tipo de manejo tiene también una incidencia directa sobre la magnitud de la EE. Buschiazzo *et al.* (2007) determinaron, en un Haplustol Entico, pérdidas de 72 kg ha⁻¹ y 8,8 kg ha⁻¹ en labranza vertical y convencional, respectivamente, en un período de sólo 19

días. Las menores EE de la labranza convencional se debieron a una mayor rugosidad superficial. La siembra directa, en tanto, con un 90% de cobertura de residuos erectos, funcionó como captador de partículas, debido a que se produjeron ganancias de hasta 34 kg ha⁻¹. Li *et al.* (2004) determinaron que la EE de un Entisol alcanzó 232,1 kg ha⁻¹ y la entrada de polvo atmosférico 19,9 kg ha⁻¹ por día, resultando la entrada de nutrientes en aproximadamente 1/10 de las pérdidas que genera la EE.

La EE provoca un efecto “in situ”, al degradar el suelo erosionado, y otro “ex situ”, que afecta al ambiente. La degradación del suelo se manifiesta en disminución del espesor del horizonte superficial, cambios en la textura, degradación de la estructura y pérdida de la fertilidad química por disminución en el contenido de materia orgánica y nutrientes (Lyles y Tatarko, 1986; Buschiazzo y Taylor, 1993; Gabel, 1993). Estas alteraciones pueden afectar el rendimiento de los cultivos (Silenzi *et al.*, 1993; Lyles, 1975; Armbrust, 1984), o puede provocar impactos negativos sobre el ecosistema. Esto se debe a la emisión a la atmosfera de partículas finas de diámetro geométrico menor a 10 micrones (PM₁₀), las que se visualizan en forma de tormentas de polvo. El potencial de emisión de PM₁₀ dependerá de la textura del suelo (Carvacho *et al.*, 2004, Funk *et al.*, 2008).

Si bien se ha avanzado en el conocimiento del proceso de EE y su cuantificación, se carece de información acerca de la calidad del material que se erosiona. A nivel global hay muy pocas investigaciones relacionadas a la composición física y química del material erosionado a nivel de predio (Sankey *et al.* 2012; Zobeck *et al.* 1989; Zobeck *et al.* 1986a; Zobeck *et al.* 1986b; Zenchelsky *et al.*, 1976).

MECANICA DEL PROCESO EROSIVO

El proceso de erosión eólica se inicia cuando la velocidad del viento excede la velocidad umbral requerida para iniciar el movimiento de las partículas. Esta velocidad umbral puede variar de acuerdo a algunas características de la superficie del suelo, como proporción de agregados erosionables, contenidos de humedad y rugosidad del terreno, o por

la presencia de materiales que cubran la superficie del suelo, como pedregosidad, residuos yacentes/erectos o canopia de cultivos (Saleh and Fryrear, 1998).

La EE del suelo involucra cuatro procesos: movilización, abrasión, transporte y depositación de partículas. Las fracciones erosionables del suelo (menores a 0,84 mm de diámetro) pueden ser transportadas por el viento por: suspensión, saltación o rodadura (Figura 1). En este texto, la palabra “partícula”, se utiliza en forma genérica, dado que el transporte por parte del viento involucra también agregados del suelo y no sólo partículas individuales. El modo de transporte depende principalmente de dos factores: de la capacidad de transporte del viento determinada por su velocidad, turbulencia, viscosidad, entre otros; y de las propiedades aerodinámicas de las partículas, las que dependen de su tamaño, forma y densidad (Saxton *et al.*, 2001). El movimiento de las partículas del suelo está influenciado por fuerzas que ejerce el viento sobre la superficie, denominada fuerza de arrastre, la cual depende de la tasa de incremento de la velocidad con la altura y define la pendiente de la curva de distribución de la velocidad del viento respecto a la altura (Chepil, 1958a). Existen tres fuerzas que definen la movilización de las partículas del suelo por el viento, dos de ellas son desestabilizadoras y producto de la incidencia del viento sobre la partícula: una horizontal de tracción que es proporcional a una fuerza de resistencia y a la superficie expuesta de la partícula y otra vertical ascendente a la superficie del suelo, que es la de succión producida por diferencia de presión debajo y encima de la partícula. La tercera fuerza es de carácter estabilizador y es la producida por la gravedad (peso de la partícula) Chepil (1961). Iversen *et al.* (1976) comprobaron que existe una cuarta fuerza, producida por el contacto entre partículas, que se agrega a la de gravedad y se opone a la fuerza de arrastre del viento y a la fuerza de succión. Por lo tanto para calcular la fuerza total se debe tener en cuenta el ángulo formado entre la vertical y el punto de apoyo entre dos partículas. Para que se inicie el proceso de erosión las fuerzas aerodinámicas deben superar a las fuerzas estáticas que son las que mantienen a las partículas agrupadas sobre la superficie del suelo. El proceso de erosión comienza cuando el viento supera una velocidad mínima que permite iniciar el movimiento, que es la “velocidad umbral”. Así las partículas más erodables son puestas en movimiento al vencer la resistencia impuesta por ellas. Al excederse la misma, partículas de diferente tamaño están en movimiento al mismo tiempo

dado que algunas son eyectadas a la corriente de aire, de esta forma, se alcanza los que se denomina “velocidad umbral máxima”.

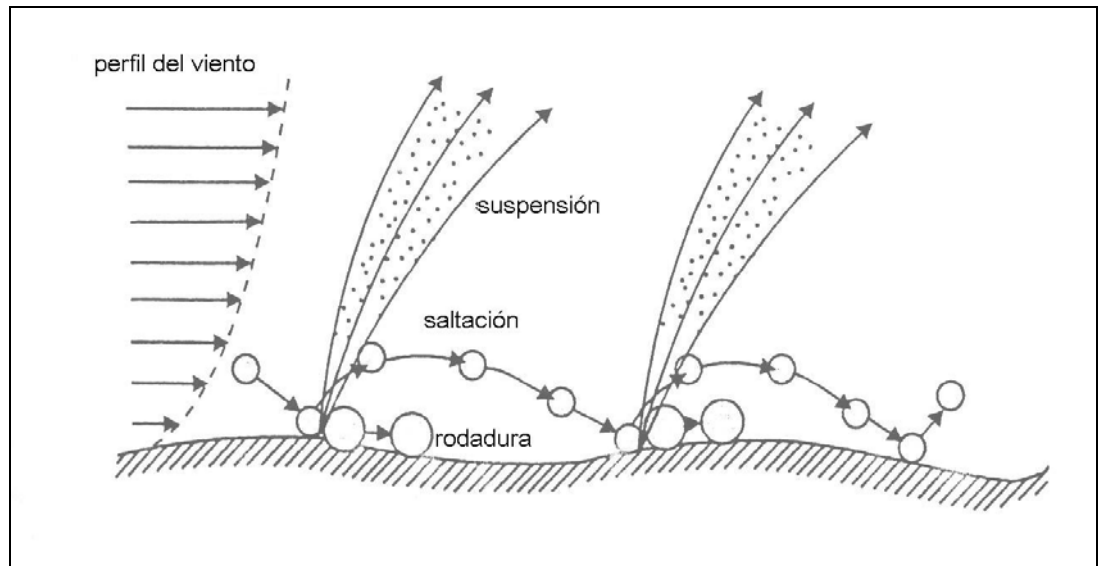


Figura 1.1: Representación del perfil de viento y de los movimientos de rodadura, saltación y suspensión.

El término **abrasión** hace referencia a la masa de material abrasado por unidad de masa de partículas que impactan sobre el mismo (Buschiazzo y Aimar, 2003). La abrasión es definida por varios factores, entre ellos se encuentran la velocidad media de las partículas impactantes, el ángulo de impacto de las partículas con el plano de la superficie, el diámetro medio de las partículas abrasivas, la estabilidad mecánica de las partículas abrasivas y de la superficie abrasada y por último, la densidad del abrasivo (Hagen, 1984). La abrasión también afecta la distribución de tamaño de los agregados y su acomodamiento espacial dentro del sistema suelo (Buschiazzo y Aimar, 2003).

Las partículas, una vez puestas en movimiento por el viento, son transportadas (por rodadura, saltación y/o suspensión), y sedimentadas a menor o mayor distancia, dependiendo de su tamaño (Buschiazzo y Aimar, 2003).

El transporte por **rodadura** se produce cuando las partículas son grandes y no pueden ser transportadas en el flujo de aire, pero ruedan sobre la superficie como

consecuencia del empuje del viento, o sea que es un transporte que se realiza sin un despegue de las partículas de la superficie del suelo. Generalmente por rodadura se traslada entre el 7 y el 25 % del total del suelo movido y la masa consiste en partículas de 500 a 1000 μm de diámetro (Bagnold, 1941; Chepil, 1945). La rodadura, en condiciones de vientos fuertes, aparenta ser un movimiento de avance general de la superficie del suelo, en la dirección predominante de viento. Las partículas por rodadura no se trasladan a grandes distancia por lo que se considera un transporte pasivo, pero en el movimiento pueden desgastarse hasta alcanzar el tamaño que permita que se muevan por saltación y/o suspensión, cambiando de esta manera su forma de transporte (Chepil, 1945).

Las más pequeñas o menos densas, de 100 a 500 μm de diámetro, pueden ser transportadas por el aire con un ángulo de despegue que oscila entre 75-90°, pero retornan a la superficie del suelo golpeando con un ángulo entre 6 y 12 ° (Chepil, 1961). Este modo de transporte es el llamado **saltación** y comprende entre un 50 y un 80 % del total de material transportado por el viento (Lyles, 1988). Generalmente, las partículas se elevan a menos de 120 cm de altura, movilizándose el 60% de ellas a una altura inferior a 5 cm. Chepil (1945) demostró que las partículas, en su transporte, giran sobre su propio eje rotando con una aceleración entre 200-1000 rps. El movimiento de saltación es regular y asimétrico y se calcula a través de la proporción entre la altura de elevación (h) y la longitud de la trayectoria (L). Chepil (1945) encontró, para suelos agrícolas, una relación h/L de 1:10. Aunque otros autores consideran que la distancia recorrida varía entre 12 y 25 veces la altura máxima alcanzada (Cooke *et al.*, 1993).

La saltación es la forma más importante en el proceso de erosión ya que provoca además, los movimientos de suspensión y rodadura. Las partículas son eyectadas desde el suelo al ser elevadas por la masa de aire, siguiendo diferentes trayectorias, dependiendo de la resistencia del aire y de su peso. Una vez puestas en movimiento y transportadas en el flujo de aire, las partículas aceleradas transfieren su impulso a la superficie a través del impacto, pudiendo disgregarse, desintegrar otras partículas presentes en la superficie del suelo de manera que más partículas se emiten al aire (Dong *et al.*, 2003), o rebotar y reiniciar el movimiento nuevamente (Lyles, 1988). Chepil (1957) considera que el proceso de saltación tiene un efecto “avalancha” ya que produce un efecto multiplicador de la

erosión, la que se incrementa en forma exponencial al aumentar la distancia recorrida. Este movimiento tiene influencia principalmente a nivel de lote. Chen *et al.* (1998) comprobaron además que la proporción relativa de material movido por saltación aumenta con el aumento de la perturbación del suelo, por lo que las tasas de erosión y la emisión de polvo pueden limitarse si se disminuye el trabajo mecánico en temporadas secas. Otro aspecto a tener en cuenta en este movimiento es la composición de la fracción movilizada por saltación. Cuando predominan en esta fracción partículas individuales, la energía que se desencadena sobre la superficie del suelo es mayor que cuando predominan agregados y esto estaría dado por una mayor densidad en las partículas minerales que en los agregados. De acuerdo a Alfaro (2008), suelos más arenosos provocarían una mayor emisión de partículas finas. Se considera que por medio de la saltación, el proceso erosivo por viento provoca una mayor pérdida de suelo y nutrientes que aquella que se puede producir por erosión hídrica, aunque en éste último caso el material sea transportado fuera del área donde se produce la erosión (Visser *et al.*, 2005). Las partículas que por su tamaño o peso se mueven por rodadura o saltación, se movilizan a través de un flujo horizontal (FH), y serán transportadas a distancias relativamente cortas, de hasta unos cientos de metros (Zhang *et al.*, 2011).

En cambio, las partículas entre 2 y 100 μm pueden ser transportadas por **suspensión** a cientos o miles de kilómetros afectando la calidad del ambiente (Gillette and Walker, 1977) movilizándose principalmente a través de un flujo vertical (FV) (Karaca *et al.*, 2009) y esporádicamente en forma horizontal. Füllen and Mitchell (1991) reportaron que en el observatorio de Mauna Loa (Hawai) han detectado polvo en la atmósfera proveniente de las áreas desérticas de China situadas a 5.000 km al oeste. Se considera que entre un 3-38 % del suelo erosionado puede ser transportado por suspensión, dependiendo de su textura (Chepil, 1945). El proceso de erosión eólica se vuelve perceptible mediante este tipo de transporte, en forma de tormentas de polvo. Las partículas menores a 20 μm son las que mayormente componen la fracción del material erosionado por suspensión y la mayor parte de ellas se generan durante el proceso erosivo, mediante la acción de abrasión que ejercen las partículas que se mueven por saltación. Las partículas mayores a 20 μm no son transportadas por suspensión debido a que, por su tamaño o por su mayor densidad, poseen mayor velocidad de sedimentación (Gillette, 1977).

Se estima que cada año existe una emisión de PM₁₀ a la atmosfera de 2000 MMg, de los cuáles el 75% se vuelve a depositar en la superficie terrestre y el restante 25 % lo hace en el mar (Shao *et al.*, 2011). Al presente se estima que la agricultura contribuye entre un 10 y 50 % de las emisiones globales de polvo (Tegen y Fung, 1995; Tegen *et al.*, 2004). La emisión potencial de PM₁₀ de los suelos medida en laboratorio es usada para evaluar la intensidad de emisión, la composición y el impacto de los aerosoles minerales sobre la salud y el ambiente (Gill *et al.*, 2006). Algunos estudios indicaron que la toxicidad por unidad de masa se incrementa cuando decrece el tamaño de las partículas (Lingard *et al.*, 2005). En la ciudad de Méjico se determinó que los materiales geológicos que producen emisiones de polvo poseen de la masa total de las PM₁₀, un 23 % de partículas PM_{2.5} que resultan de mayor riesgo (Vega *et al.*, 2001).

Los efectos sobre el ambiente son diversos, contándose la intransitabilidad de caminos, la colmatación de diques, el deterioro de construcciones rurales y urbanas, que pueden generar pérdidas económicas superiores a las que se producen en el suelo (Huszar and Piper, 1986; Lal, 2003). Estas partículas finas de polvo presentes en las capas más altas de la atmosfera afectan directa e indirectamente las propiedades físicas y químicas de la misma, como la formación de nubes y el balance de la radiación (Seinfeld and Pandis, 1997), participan de los cambios del clima global (McConnell, 2007) o pueden alterar las cadenas tróficas marinas (Meskhidze, 2007) ya que activan el crecimiento del fitoplancton que modifica el ciclo de elementos en el mar como por ejemplo, el Fe (Zhuang *et al.*, 1990) o el Si (Harrison, 2000). Se ha comprobado que las deposiciones de PM₁₀ también pueden modificar el ciclo de los nutrientes en ecosistemas naturales. Por ejemplo los bosques del Amazonas reciben anualmente una fuente natural de minerales como fertilización desde la depresión de Bodélé, situada en el Sahara. La entrada de polvo anual está determinada en 40 millones Mg, es decir unos 0,7 millones Mg diarias (Koren *et al.*, 2006). También desde el este de Mauritania, oeste de Mali y sur de Algeria se produce un aporte de polvo atmosférico al Mar Mediterráneo, Mar Rojo, Europa y Medio Oriente (Goudie and Middleton, 2001).

Además, la exposición a partículas PM₁₀ puede producir efectos adversos sobre la salud humana (Iwai *et al.*, 2005) y por ende aumentos en la mortalidad y morbilidad (Pope

et al., 1995; U.S. EPA, 1995; Pope and Dockery, 1998). Estas se alojan irreversiblemente en el sistema respiratorio y está comprobado que aquellas menores a $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) se localizan en las paredes alveolares pudiendo producir alergias, asma y enfisemas pulmonares (Schprentz, 1996).

El movimiento por el cual las partículas son transportadas está condicionado a la textura del suelo, ya que los contenidos de arena disminuyen y los de limo se incrementan al aumentar la altura (Füllen, 1985; Zobeck y Fryrear, 1986a). La velocidad del viento y la naturaleza de la superficie del suelo también condicionan la cantidad de material que se erosiona y el tipo de movimiento por el que se trasladan. Fryrear y Saleh (1993) encontraron que el límite entre el movimiento por saltación y suspensión no es estático y depende de dichas condiciones, y hallaron valores desde 0,11 hasta 0,31 m para suelos de EEUU. Por otra parte, estudios efectuados en un suelo franco arenoso fino de Texas, demostraron que la concentración del material que se mueve por suspensión entre 2 y 5 m de altura resultó ser de 2 a 5 veces superior a la estimada entre las alturas de 5 a 10 m (Zobeck y Van Pelt, 2006), y que la relación existente entre la cantidad de material erosionado por FH y FV depende en gran medida de que durante el evento erosivo no haya cambios en la dirección del viento. Es decir que, las condiciones climáticas (velocidad, dirección e intensidad del viento y duración de la tormenta) y la composición textural del suelo, condicionarán la cantidad de material transportado por cada tipo de movimiento y la distancia que alcanzará dicho material desde la fuente de origen.

CALIDAD DEL MATERIAL EROSIONADO POR EL VIENTO

Son escasos los estudios efectuados en Argentina y el mundo acerca de la composición del material erosionado. Esto impide conocer la incidencia del proceso sobre a) el balance de elementos nutrientes para las plantas y por ende sobre la fertilidad del suelo (Ramsperger *et al.*, 1998a; Ramsperger *et al.*, 1998b; Hermann, 1996; Littmann, 1997), b) la dinámica del C, de importancia para la fijación desde o la liberación a la atmósfera del elemento, considerando sus potenciales efectos sobre el cambio climático

global (Webb *et al.*, 2012), y c) los contenidos de sustancias contaminantes, como partículas finas (PM₁₀), metales pesados, componentes orgánicos y otros. López Cancio *et al.*, (2008) encontraron que algunas especies metálicas derivaban de fuentes naturales, como Na, K, Ca y Mg y otras como Cu, Cr, Pb, Cd, Ni y Zn eran de origen antrópicos.

Granulometría del material erosionado

Se ha demostrado que la fracción granulométrica de diámetros entre 20 y 100 μm (arena fina y limo grueso), es la más susceptible a ser transportada por el viento (Chepil, 1958b), datos éstos corroborados posteriormente para materiales sedimentarios eólicos (Füchtbauer y Müller, 1977). Pye (1987) analizó la granulometría de material transportado en suspensión que correspondió a la fracción limo y en su mayoría con un diámetro cercano a los 20 μm . Algunos autores encontraron que la distribución de tamaño de partículas entre el material erosionado y el suelo original se asemejaban (Fryrear 1987, Chen y Fryrear, 1996). En otros estudios en tanto, los resultados fueron contrarios, ya que el material erosionado fue de textura más fina a la del suelo que provenía (Gillette *et al.*, 1972). Estos autores también hallaron que ese material erosionado tenía la misma granulometría cuando era transportado a igual velocidad del viento. Otro factor que puede influir en la composición del material que se erosiona es el disturbio de la superficie del suelo en forma mecánica. Chen *et al.*, (1998) compararon los gráficos de frecuencia (porcentaje en peso de las partículas en función del diámetro de las mismas) del suelo original y del material erosionado y hallaron, que el primero presentó una distribución bimodal, con un pico dominante en el diámetro de partícula de 0,08 mm y un pico subordinado en 0,02 mm. El gráfico del suelo erosionado resultó más fino, ya que presentó picos que correspondieron a partículas de 0,05 y 0,01 mm de diámetro. El 70% del material erosionado mostró un diámetro medio de partículas de tamaño limo. En la medida que la perturbación del suelo fue mayor, el sedimento erosionado tuvo partículas de menor tamaño y la cantidad relativa de las partículas finas se incrementaron.

Buschiazzo y Taylor (1993), a través de la comparación de suelos sometidos a manejos contrastantes, comprobaron que suelos de textura arenosa franca sufrían cambios

más pronunciados que los franco arenosos. Estos cambios en los horizontes superficiales se habrían debido a pérdidas de diferentes fracciones texturales (limo y arcilla en suelos arenoso franco, y de arena muy fina y limos en los suelos franco arenoso). La diferente erosionabilidad hallada de acuerdo a la textura del suelo no se condice con lo encontrado por Alfaro *et al.*, (2004), quienes consideraron que la textura del suelo no era un aspecto relevante que determinara la calidad textural del material que se erosiona. Ellos determinaron que la producción de material erosionado estaba relacionada a la rugosidad del suelo y la distribución de agregados en seco.

Aimar (2002) demostró que el limo es la fracción textural acumulada en mayor proporción en el material erosionado, dando índices de enriquecimiento con respecto al suelo original de 32% para un Ustipsammente Típico y 20 % para un Haplustol Entico. Tales tendencias habrían sido producidas porque el suelo de textura más gruesa tenía mayor cantidad de partículas del tamaño arena, que son demasiado grandes para que el viento pueda transportarlas por suspensión a grandes distancias. El suelo texturalmente más fino tenía mayor cantidad de arcillas, que generalmente se encuentran formando agregados, que son más resistentes a la abrasión producida en el proceso erosivo, que aquellos formados por limo (Chepil, 1957). Por ello, el material estuvo enriquecido en limos. Sin embargo, en el interior de Mongolia la EE severa produjo también una reducción de arcillas en un 59,6 % respecto al suelo original (Zhao *et al.*, 2005).

La mayoría de los estudios de flujo de masa y transporte de partículas están basados en representaciones a escala macroscópica de la erosión. Estudios efectuados en la región de Mali, demostraron que la distancia de la fuente de aporte de material estaba relacionada con el tamaño del mismo. Así, en esa región se establecieron 3 áreas de aportes. Los materiales erosionados que provenían de grandes distancias estaban constituidos por partículas menores a 5 μm de diámetro. Cuando provenían de fuentes regionales se producían depósitos de partículas entre 20 y 40 μm y cuando el aporte era localmente, el tamaño de las partículas transportadas eran de 50 a 70 μm . (McTainsh *et al.*, 1997). Szelagowski *et al.* (2004), estudiaron la sedimentología y granulometría de depósitos eólicos del centro de Argentina. La granulometría del material estuvo caracterizada por

arenas medias a finas bien seleccionadas con distribución unimodal, movilizadas por saltación y/o suspensión en un corto tiempo. Si bien encontraron que dichos depósitos exhibían una zonación granulométrica con exposición de facies más gruesas en la provincia de La Pampa y de arenas muy finas y limos en el noreste de Buenos Aires y Santa Fe, los análisis granulométricos no indicaron que el tamaño de grano disminuyera en relación directa con la distancia de transporte, y sugirieron que otros factores a escala local, como relieve o las áreas de procedencia, influirían en la variabilidad granulométrica.

Ferrerira y Oliveira (2009), presentaron resultados experimentales de la erosión eólica de partículas de arena. Modelaron las variaciones producidas en la superficie debido a la remoción y deposición de partículas. Cuando los sedimentos se ponían en movimiento, el nivel de transporte del viento se basaba en una condición de equilibrio donde la ecuación que expresaba el flujo de transporte de arena por unidad de tiempo dentro de un cubo de control, debía estar balanceado por el flujo de salida, para lo cual se requería una distancia infinita desde el punto donde el sedimento iniciaba su movimiento. Sin embargo, Horikawa *et al.* (1983) demostraron que para el caso de la arena seca de playa esa distancia era del orden de 5 m y para arenas con un contenido de humedad de 3-4% requerían una distancia de 10 m. La erodabilidad del suelo entonces, es un proceso dinámico y su control variaría de acuerdo a la escala espacial. A la escala espacial más pequeña las variaciones en la erodabilidad del suelo estarían controladas por el tamaño de partícula, la mineralogía, el contenido de humedad, fuerzas electrostáticas y presencia de micro biota, entre otros (Cornelis y Gabriels, 2003). Estos factores juntos determinarían el peso del agregado, arrastre y fuerzas de cohesión entre partículas y por ende, la velocidad umbral que influirían en la erodabilidad a escala de parcela, donde el viento impulsaría procesos de saltación, emisión y deposición de partículas. A la escala de “paisaje”, el control estaría dado por la cobertura, temperatura, labranzas, entre otros y, a escala “regional” por la geomorfología, clima o uso de la tierra (Webb y Strong, 2011). Por lo expresado, la calidad del material erosionado podría ser estudiada a diferentes escalas.

Se han efectuado estudios de deposición de partículas en túnel de viento teniendo en cuenta superficies rugosas dejadas por el movimiento del agua (Zufall *et al.*, 1999) o

diferentes grados de cobertura vegetal (Suter-Burri *et al.*, 2013) o bien evaluando la resistencia de diferentes costras (O'Brien y McKenna Neuman, 2012). No hay trabajos en Argentina, de comparación de suelos genéticamente diferentes y su transporte a través de una superficie lisa, con movimiento de partículas bajo condiciones controladas. No se conoce tampoco la cantidad de material transportado desde la fuente de emisión que, teniendo en cuenta una evaluación a pequeña escala (túnel de viento), dependería de la granulometría del suelo erosionado.

Emisión de partículas finas (PM₁₀)

Como se describió, el material erosionado puede transportarse por rodadura o saltación a lo largo de distancias relativamente cortas (algunos cientos de metros) y a baja altura, o mediante suspensión a lo largo de varios cientos de km y alturas muy elevadas (Engelstaedter *et al.*, 2006; Tan *et al.*, 2012; Lenés *et al.*, 2012). La cantidad de material erosionado disminuye exponencialmente con la altura y ello está en relación a la necesidad de una mayor energía de viento que es necesaria para movilizar las partículas más gruesas y pesadas. Los principales procesos de transporte se dan por FH ya que más del 90% del movimiento de material se produce dentro de los primeros 15 cm sobre la superficie del suelo (Zobeck *et al.*, 1989), pero el material transportado por suspensión (FV), es la principal fuente de emisión de polvo a la atmósfera. En los últimos años se han intensificado los estudios tendientes a evaluar las superficies de tierra que actúan como fuente de emisión de polvo, como suelos agrícolas y principalmente lagos efímeros y desiertos (Gaiero *et al.*, 2007, Lenés *et al.*, 2012; Trapp *et al.*, 2012; Calvo *et al.*, 2013). Sin embargo, la incertidumbre sobre las estimaciones de la emisión de polvo media anual se deben principalmente al pobre conocimiento de las capacidades de descarga de diversas fuentes individuales (Xuan y Sokolik, 2002). Al presente, en Argentina no se conoce el potencial de emisión de PM₁₀ que tienen los diversos suelos.

El potencial de emisión de un suelo depende de su composición. De acuerdo con estudios previos la emisión de PM₁₀ aumenta con el contenido de limo y arcilla en el suelo y decrece con el contenido de arena (Environmental Protection Agency of United State, U.S. EPA 1995; Carvacho *et al.*, 2004). Sin embargo otros estudios han encontrado que

suelos de textura similar pueden descargar cantidades significativamente diferentes de polvo, señalando que las diferencias podrían deberse a diferencias en el contenido de MO, la distribución de agregados y la estabilidad de los mismos (Zobeck *et al.*, 1997; Gill *et al.*, 1999; Alfaro, 2008). Sin embargo los autores anteriores no pudieron demostrar como la MO, la distribución de agregados y la estabilidad se relaciona con la emisión de PM₁₀. Las fracciones texturales y la MO son los parámetros de suelo más conocidos, disponibles para la mayoría de los suelos del mundo. Es por esto que resulta de interés relacionar la emisión de PM₁₀ con las fracciones texturales y la MO, ya que permitirían estimar la emisión de PM₁₀ a partir de parámetros de suelo ya existentes sin necesidad de realizar mediciones adicionales.

La humedad del suelo es reconocida también como uno de los factores más importantes que controla la emisión de polvo, ya que la humedad favorece el pegado entre partículas al promover el desarrollo de una película de agua entre los granos del suelo (Clausnitzer y Singer, 1996; Fécan *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2006; Funk *et al.*, 2008). A diferencia de otros factores que afectan la emisión de polvo, la humedad es altamente variable en la escala espacio-temporal. La emisión actual de PM₁₀ es dominada por el contenido actual de humedad de una capa variable de suelo (los primeros centímetros en el caso de la erosión eólica y los primeros decímetros en el caso de las labranzas). El efecto de la humedad sobre la emisión de polvo depende de la textura. Suelos arcillosos necesitan mayor cantidad de agua que suelos arenosos para inhibir la emisión de PM₁₀ (Funk *et al.*, 2008). Aumentos similares en el contenido de agua reducen más la emisión de PM₁₀ en los suelos arenosos que en los arcillosos. En los suelos arcillosos, el agua en primer lugar penetra al centro del agregado y luego une las partículas finas. Mientras que en los suelos arenosos, el agua une primeramente las partículas finas con los granos de arena (Funk *et al.*, 2008). No hay información disponible sobre el efecto de la humedad en la emisión de PM₁₀ de suelos de texturas semejantes.

Otros estudios han evaluado como las condiciones meteorológicas y estacionales afectan la concentración y el tamaño de partículas que son transportadas. Estas condiciones producen un efecto sobre la estabilidad de la capa límite, que es la región próxima a la superficie del suelo, en la cual el movimiento del viento es de tipo laminar, su velocidad es

igual a cero, y por ende su energía de transporte es nula (Geiger, 1957). Por ejemplo en la península ibérica la capa límite es más estable en invierno que en primavera, de manera que las concentraciones de partículas son más altas en invierno cuando la disolución del volumen de aire es menor (Gómez Moreno *et al.*, 2011). Se determinó que fuertes vientos pueden producir bajas concentraciones (Kumar *et al.*, 2008) o más altas, por procesos de re-suspensión de partículas mayores que 100 nm (Charron y Harrison, 2003). La influencia de la fuerza del viento en la distribución del tamaño de partículas ha sido estudiada en unos pocos trabajos. Hussein *et al.* (2006) observó para Helsinki una buena correlación entre la concentración de partículas y temperatura ambiente y condiciones locales del viento. Gomez-Moreno *et al.* (2011) encontraron en Madrid que el tamaño de partículas presentó un marcado ciclo anual que estuvo influenciado por la estación, ya que afecta el perfil de emisión de partículas dependiendo si es invierno (con sistema de emisión) o primavera y verano (donde se observa generación de partículas). Altas velocidades de viento causan una disminución en la concentración del número de partículas y en el modo de distribución por tamaño que es lo que se daría en invierno. Dichos autores sugieren que la insolación y la temperatura son importantes variables en la generación de partículas.

Composición química del material erosionado

La concentración de elementos en el material erosionado es fuertemente condicionada por la textura del suelo del cual proviene. Estudios previos han demostrado que suelos de texturas finas producen material erosionable más enriquecido en MO y en elementos nutrientes que los de textura gruesa (Aimar, 2002).

En Sahel, la pérdida de nutrientes en un evento erosivo puede representar hasta el 73% de N y el 100% de P necesarios para la producción de un cultivo (Visser y Sterk, 2007). En suelos arenosos bajo pastizales de Hoqin, se calculó que en los últimos 100 años se perdieron por desertificación 107,53 Mt de carbono y 9,97 Mt de nitrógeno, dando 3,6 kg m⁻² y 0,3 kg m⁻² por unidad de área (Zhou *et al.*, 2008).

La concentración de elementos en el material erosionado generalmente aumenta con la altura de muestreo (Laprade, 1957; Zobeck y Fryrear, 1986b) pero los patrones de distribución de esas concentraciones pueden ser diferentes para cada una de ellas. Se ha comprobado que Cu, K, Mg, Mn, Fe, Zn y P están inversamente concentrados de acuerdo al tamaño de los agregados, es decir que con el transporte de pequeños agregados se pierde una importante concentración del elemento (Li *et al.*, 2009a.; Masri *et al.*, 2003; Van Pelt y Zobeck, 2007; Zenchelsky *et al.*, 1976; Zobeck *et al.*, 1989) y mayor aun cuando la fracción analizada ha sido menor a los 10 μm de diámetro (Van Pelt y Zobeck, 2007). El Ca constituye una excepción dado que se concentra en agregados de 50 a 104 μm de diámetro disminuyendo la concentración en los más pequeños y en los más gruesos (Aimar, 2002). Por lo tanto, para que Ca sea transportado se requerirá vientos de mayor intensidad que para los restantes elementos. El C también se encuentran más concentrado en agregados de menor tamaño, pero cuando el suelo es de textura fina, no existe tanta variabilidad en la concentración de C y los distintos tamaños de agregados (los más pequeños tienen el doble de C que los agregados más grandes). En los suelos arenosos en tanto, el agregado con menos concentración tiene 13 veces menos de C que el agregado más fino (Aimar, 2002). C y N además, forman agregados de una baja densidad (Barthès *et al.*, 2008) por lo cual aún con vientos de baja energía serían fácilmente transportables. Los agregados menos densos pueden ser transportados por suspensión a mayores distancias de la fuente de origen. Generalmente la deposición del N orgánico es un componente subestimado en el ciclo del N, aunque Neff *et al.* (2002) consideran que el transporte eólico puede ser un aporte importante al flujo global del N.

La EE también provoca una redistribución de elementos en el paisaje. Por ejemplo se comprobó que en las áreas de lomas, un suelo erosionado tiene significativamente menos carbono orgánico (CO) que el de las áreas de deposición, resultando responsables de ello el agua, la labranza del suelo y la erosión por viento. (Ritchie *et al.*, 2007). De ésta forma los sedimentos eólicos pueden modificar la calidad del suelo, lo que también implicaría un cambio en la calidad del material que se erosiona a través del tiempo (Godlinski *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009a).

La tasa de enriquecimiento (TE) es un parámetro muy utilizado por algunos autores para comparar la calidad entre el sedimento erosionado y el material parental, que surge de la relación de un determinado nutriente del polvo respecto al del horizonte erosionado (Hagen y Lyles, 1985). Gile y Grossman (1979), colectando material durante 11 años en Nueva México, encontraron que a 0,3 y 0,9 m de altura las TE de MO variaron entre 4 y 19. Por otra parte, en el norte de China, se comprobó que en los suelos degradados el contenido de C y N declinó entre un 66 y 73 %, respectivamente, siendo las estimaciones anuales de pérdida por cada centímetro de suelo entre 53 y 1044 kg ha⁻¹ para C y entre 5 y 90 kg ha⁻¹ para N (Wang *et al.*, 2006). Semejantes resultados se hallaron en el interior de Mongolia, donde la erosión severa produjo una reducción de 31,4 % en el contenido de P total, de 71,2 % del C orgánico y de 67,4 % del N total (Zhao *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2006). En Nigeria en tanto, se encontró que el material colectado a 0,05 m de altura era semejante en su composición al suelo original, pero la TE del obtenido a 0,5 m estaba enriquecido en tres veces respecto al suelo superficial (Sterk *et al.*, 1996). Ellos demostraron que la principal masa de nutrientes era transportada por saltación pero que el material en suspensión estaba más enriquecido en nutrientes. Trabajando en parcelas experimentales de 40 x 60 m, reportaron luego de dos tormentas TE de 57,1 kg ha⁻¹ de K, 79,6 kg ha⁻¹ de C, 18,3 kg ha⁻¹ de N y 6,1 kg ha⁻¹ de P (Sterk *et al.*, 1996).

Respecto al fósforo (P), Füllen (1985) estudiando suelos arenosos en el este de Inglaterra, encontró en muestras de polvo 1457 ppm de fósforo, unos 100 ppm más que en el horizonte Ap del suelo original, y el doble de lo hallado en el suelo arenoso de esa región. Está comprobado que las pérdidas de P total en suelos loésicos de la RSPC, son superiores a la extracción que realizan las plantas, y se atribuye la diferencia a procesos de degradación, principalmente de EE. Buschiazzo *et al.*, (2000), observaron en suelos de textura más fina (Haplustoles), un decrecimiento en la fracción de P inorgánico producto de la erosión, y una disminución de la fracción orgánica en los suelos arenosos producto de la mineralización.

Otros nutrientes, como K, Mg, Ca, Zn, Cu, Fe y Mn se comportan de igual forma, es decir la concentración del elemento en el material erosionado aumenta a medida que se colecta a mayor altura. La concentración del nutriente en el material siempre es mayor

cuando el suelo erosionado es texturalmente más fino. (Aimar, 2002; Aimar *et al.*, 2010). Por este motivo, la clase textural del suelo y el tipo, clase y grado de la estructura estarían condicionando el tipo de material que se erosiona.

La mayoría de los trabajos abordan el tema de cuantificación de la erosión eólica, de emisión de polvo y su relación con las PM₁₀. Numerosos trabajos han analizado las tasas de deposición de polvo y la composición física, química y/o mineralógica de las partículas para distintas regiones del mundo, por ejemplo, en países africanos (McTainsh y Walker, 1982; O'Hara *et al.*, 2006), EEUU (Prospero *et al.*, 1987), Canada (Zdanowicz *et al.*, 1998), España (Avila *et al.*, 1997; Fiol *et al.*, 2005), Alemania (Cercasov y Wulfmeyer, 2008; Kufmann, 2006); Francia (Deangelis y Gaudichet, 1991), Grecia (Terzi *et al.*, 2010), Iran (Rashki *et al.*, 2012), China (Zhang *et al.*, 1998; Wake *et al.*, 1994), Japón (Uematsu *et al.*, 2003), Australia (Cattle *et al.*, 2002), Nueva Zelanda (Marx y McGowan, 2005) Méjico (Vega *et al.*, 2001) o Argentina (Ramsperger *et al.*, 1998a, López *et al.*, 2011). En tanto son muy escasos los estudios que tengan en cuenta la calidad del material que se erosiona a nivel de lote, el impacto que esas pérdidas producen en el sitio erosionado y la influencia del proceso en el ecosistema con el aporte de material a la atmósfera. El conocimiento del proceso, su cuantificación y la posibilidad de realizar predicciones respecto a los efectos que produce, pueden ser los caminos para lograr un control adecuado y evitar la degradación de los suelos (Fryrear, 1990).

La calidad del material erosionado en distintos tipos de suelos darán como resultado diferentes patrones de distribución de los elementos con la altura. Estos pueden definir la proporción en que cada elemento será transportado por suspensión, con lo cual estaría afectando en ese caso en mayor medida a la calidad del aire; o por saltación o rodadura, caso en el cual afectará, fundamentalmente, la calidad del suelo a nivel de predio.

HIPOTESIS

H1. Los suelos desarrollados sobre materiales loésicos, al presentar mayor contenido de limo y arcilla, tienen mayor potencial de emisión de partículas finas (PM_{10}) que aquellos desarrollados sobre arenas eólicas y sedimentos terciarios.

H2. En las PM_{10} emitidas por suelos loésicos predominan agregados, en tanto que en las emitidas por suelos desarrollados sobre arenas eólicas y sedimentos terciarios predominan partículas minerales individuales.

H3. El material erosionado posee granulometrías más finas que los suelos originales.

H4. El material erosionado desde suelos loésicos es transportado a mayor distancia que el material erosionado desde suelos terciarios o arenosos.

H5. El material erosionado desde suelos loésicos, al poseer una mayor concentración de sustancias orgánicas, se encuentra enriquecido en elementos como carbono, nitrógeno y azufre, mientras que el erosionado desde suelos desarrollados sobre arenas eólicas y sedimentos terciarios, al poseer menor concentración de sustancias orgánicas, se encuentran enriquecidos en elementos asociados a fracciones inorgánicas, como fósforo, calcio y magnesio, entre otros.

H6. Los suelos desarrollados sobre sedimentos terciarios, por poseer texturas más gruesas y/o estar en regiones climáticas de mayor erosividad, pierden, en términos absolutos, mayor cantidad de elementos que los desarrollados sobre loess o arenas eólicas.

H7. Mayores velocidades y duraciones de las tormentas de viento incrementan la cantidad de suelo erosionado y la concentración de elementos en el material erosionado.

OBJETIVO PRINCIPAL

Estimar la calidad de los materiales erosionados por el viento en dominios edáficos representativos de la Región Semiárida y Árida Argentina, y analizar su contribución a la degradación de los suelos y la calidad del aire.

Objetivos específicos

O1. Evaluar el efecto de la textura, los contenidos de MO y la humedad del suelo sobre el potencial de emisión de PM₁₀. Evaluar la morfología de las PM₁₀ y la mineralogía de las partículas entre 50 a 74 μm de diámetro de todos los suelos a fin de determinar si el material está constituido por agregados o partículas minerales individuales.

O2. Comparar la composición granulométrica en los suelos originales (derivados de materiales loésicos, arenas eólicas y sedimentos terciarios) con sus materiales erosionados. Evaluar la capacidad de transporte de cada suelo en relación a su textura y distribución de agregados.

O3. Cuantificar los elementos en los suelos originales (derivados de materiales loésicos, arenas eólicas y sedimentos terciarios) y en los materiales erosionados a fin de evaluar la variación de la concentración de los elementos con la altura de transporte y entre suelos y la tasa de enriquecimiento.

O4. Cuantificar las pérdidas de suelos en eventos erosivos independientes en los distintos sitios y las pérdidas de elementos.

O5. Relacionar las pérdidas de suelo y la concentración de elementos en el material erosionado con parámetros climáticos (velocidad del viento y duración de las tormentas).

MATERIALES Y MÉTODOS

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS AREAS DE ESTUDIO

Para este estudio se seleccionaron sitios de muestro en Chaco, Jujuy, San Luis, La Pampa, Río Negro, Chubut y Santa Cruz. Todos los sitios representan dominios edáficos de la región semiárida de Argentina que se diferencian en cuanto a los materiales que dieron origen a los suelos y a la erosividad climática del lugar.

Los suelos que cubren las Planicies Chaco-Pampeanas y ambientes de montaña del NW, están constituidos por material formado por restos de rocas meteorizadas y cantidades significativas de vidrio volcánico, producto de la erupción de volcanes andinos. Este sedimento se conoce como Loess Pampeano y presenta similitud con materiales y depósitos loésicos en otras partes del mundo (Frenguelli, 1955; Teruggi, 1957). Los depósitos de loess están relacionados a mecanismos de transporte en múltiples etapas que involucran procesos eólicos y fluviales. La característica y composición del mismo dependerá del área de aporte y de los mecanismos de transporte y deposición, dando como resultado presencia de loess o sedimentos loessoides (loess retrabajado) a través de la región, siendo éstos últimos más abundantes que el loess primario.

El sistema eólico pampeano cubre más de 600.000 km² de la planicie central de Argentina. En la parte N los depósitos de loess tienen un largo de 2.000 km y un ancho promedio de 300 km. En el borde SW se encuentra un amplio depósito de arenas. El sistema eólico pampeano evolucionó durante la última glaciación máxima. La fuente primaria de estos materiales fueron generados por intemperización en ambiente periglaciares (Iriondo, 1997; Zarate y Tripaldi, 2012) y fueron transportados y acumulados por sistema fluvio-glacial.

La composición mineralógica de la fracción de arenas muy finas es dominada por cuarzo (policristalino, micro agregados y monocristalino), con vidrio volcánico ácido, líticos volcánicos y plagioclasas como accesorio. La fracción limo está compuesta principalmente por cuarzo y, en menor concentración, por feldespatos. Las texturas

gruesas y composición volcánica prevalecen en los suelos de la región sur pampeana. El loess del N de la Región pampeana y del E de Chaco está formado por materiales de textura fina que provienen de los Andes y de otras dos fuentes como son las sierras pampeanas y la cuenca del Paraná. Para el loess de los valles montañosos de Tucumán también se sugiere como fuente el sur de la Patagonia, aunque algunos autores también consideran el W de los Andes, siendo un loess formado por material mineralógico volcánico. En tanto, se cree que el material del W de Chaco es derivado de los Andes bolivianos, correspondería a un loess típico pero con dominancia de cuarzo en su composición (Zarate, 2002).

En la Región geomorfológica de Sáenz Peña la llanura de loess está disectada por paleocauces, cuyos ambientes más importantes son las abras o pampas con isletas de bosques. Los suelos del centro y norte del área son de poco desarrollo y de texturas franco a franco arenoso. En los paleocauces prevalecen las texturas arenosas. En la parte sur de la región, en tanto, los suelos son de texturas franco limosas a franco arcillosas. (Ledesma y Zurita, 1990).

En la región oriental de La Pampa, la geomorfología corresponde a una planicie. La zona se caracteriza por la presencia de una costra calcárea de un espesor de 0,40 a 2,00 m de espesor a profundidad variable. Por encima se ha depositado un sedimento arenoso, y es frecuente encontrar una capa delgada de ceniza volcánica a aproximadamente 30 cm de profundidad. Los suelos dominantes son Molisoles (Hapustoles Enticos y Típicos) y subordinados los Entisoles (Ustipsammentes Típicos) (INTA *et al.*, 1980).

Geomorfológicamente, la zona de Villa Mercedes, San Luis se encuentra en una llanura medanosa. Existen abundantes médanos originados en el pasado y actualmente fijados, aunque a veces es factible encontrar médanos activos provocados por acción antrópica. Los suelos son de clase textural arenosa franca fina, con material calcáreo por debajo del metro de profundidad. Dominan los suelos Torripsammentes Típicos y Ústicos y Ustipsammentes Típicos (Moscatelli y Puentes, 1996; Zubiarte *et al.*, 1990).

En la región de La Puna, la distribución de los materiales responde a las estructuras geológicas y al modelado fluvial. Las unidades de suelos presentan una orientación de norte a sur. Un alto porcentaje de suelos son residuales o corresponden a material transportado por agentes fluviales. Predominan los suelos generados sobre la roca madre del terciario y en menor proporción sobre rocas del ordovícico y precámbrico. Son suelos incipientes, con abundante presencia de clastos de diversos tamaños y formas. La secuencia de horizontes es (A)-C-R. (Nadir y Chafatinos, 1999). En las unidades ubicadas en el piedemonte, conos y derrames se pueden encontrar suelos con aptitud natural ganadera de baja receptividad, clasificados como Aridisoles (Cambortides, Paleargides y Haplargides) y Entisoles (Torrifluventes, Torripsammentes y Torriortentes) (Vargas Gil, 1990).

En la región ubicada entre el Lago Nahuel Huapi y el límite con la provincia de Chubut, se encuentran morenas frontales, planicies glaciales y rasgos de erosión glacial de diversa magnitud. Los depósitos del cuaternario están integrados por sedimentos glacialacustres. En general las gravas están compuestas por una elevada proporción de rocas volcánicas ácidas y mesosilícicas (Fidalgo y Rabassa, 1984).

Al sudoeste de la provincia de Chubut se encuentra el área ecológica de las sierras y mesetas occidentales. La vegetación se desarrolla sobre variados suelos del orden de los Aridisoles y Entisoles. Estos suelos presentan un horizonte superficial de textura arenosa como rasgo en común. Además, tienen una proporción importante (40% o más) de gravas y rodados en todo el perfil y un estrato calcáreo bien marcado a los 40 cm de profundidad. (Fernández y Paruelo, 1993).

Al sur de Santa Cruz predominan las geoformas que corresponden a un paisaje volcánico con relictos de antiguas planicies glaciales re TRABAJADAS por la erosión eólica. Los suelos principalmente entisoles (Torriortentes Líticos) y Molisoles (Haplocrioles Líticos y Endoacuales Líticos) se han desarrollado sobre material coluvio-aluvial y aluvio-glacial antiguos, con depósitos eólicos. (Del Valle *et al.*, 2002). Los materiales sedimentarios superficiales son del tamaño de arenas y arcillas.

SITIOS DE MUESTREO

En base a lo expuesto se establecieron los siguientes sitios de muestreo distribuidos en la zona árida y semiárida del país, de acuerdo al siguiente detalle (Figura 2.1):

- suelos derivados de materiales loésicos: Los Frentones (Chaco) y Santa Rosa y Anguil (La Pampa).
- Suelos desarrollados sobre arenas eólicas: Villa Mercedes (San Luis).
- Suelos desarrollados sobre materiales terciarios. Suelos residuales incipientes: Abra Pampa (Jujuy), sobre sedimentos glacialacustres y glacialfluviales: Río Mayo (Chubut), Potrok Aike (Santa Cruz) y Pilcaniyeu (Río Negro).



Figura 2.1. Mapa con la localización de los suelos estudiados: Abra Pampa (AP), Los Frentones (LF), Villa Mercedes (VM), Santa Rosa (SR), Anguil (AN), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

En la Tabla 2.1 se encuentran las ubicaciones geográficas y geomorfológicas de los sitios estudiados y la clasificación y principales propiedades de los suelos.

Tabla 2.1. Ubicación geográfica y geomorfología, clasificación y principales propiedades de los suelos ^(*) (textura, clase textural y MO) de los sitios estudiados (Los Frentones, Santa Rosa, Anguil, Villa Mercedes, Abra Pampa, Pilcaniyeu, Río Mayo y Potrok Aike).

SITIO	Ubicación		Régimen de Temp. y hum.	Geoformas Principales	Tipo de Suelo	Textura (%)			Clase textural	MO (%)
	Latitud	Longitud				Arcilla < 2 µm	Limo 2-50 µm	Arena >50 µm		
Los Frentones	26°22'13" S	61°27'34" W	Hipertérmico ústico- údico	Llanuras estabilizadas	Hapludol típico (1)	6,4	7,1	86,5	Arenoso franco	0,7
Santa Rosa	36°32'29" S	64°17'40" W	Térmico ústico - arídico	Lomadas y colinas que incluyen planicie con tosca subsuperficial	Haplustol éntico (2)	12,9	19,7	67,3	Franco arenoso	2,7
Anguil	36°31'44" S	64°00'33" W	Térmico- ústico- arídico	Lomadas y colinas que incluyen planicie con tosca subsuperficial	Ustipsamente típico (2)	10,4	13,3	76,3	Franco arenoso	1,2
V. Mercedes	33°40'32" S	65°27'30" W	Térmico- ústico- arídico	Llanuras medanosas generalizadas	Ustipsamente típico (1)	4,9	7,2	87,9	Arenoso	1,0
Pilcaniyeu	41°08'00" S	70°40'00" W	Mésico – xérico arídico	Planicies suavemente onduladas y disectadas, mesetas y depresiones	Haplargid xerólico (1)	4,4	6,0	89,6	Arenoso	1,4
Río Mayo	45°41'12" S	70°15'35" W	Mésico – xérico arídico	Sierras, mesetas basálticas y bajos sin salida	Xerortentes típicos (3)	5,1	3,1	91,8	Arenoso	0,5
Potrok Aike	51°57'59" S	70°22'58" W	Críico Arídico	Planicies altas disectadas, cubetas y lagunas	Xerortentes típicos (3)	14,4	11,0	74,6	Franco arenoso	3,7
Abra Pampa	22°43'21" S	65°41'49" W	Mésico - Arídico	Pedemontes y conos aluviales estabilizados en tierras altas	Paleargides típicos (3)	4,7	6,6	88,7	Arenoso	0,5

(1) Buschiazzo *et al.*, 2009; (2) Aimar, 2002; (3) Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca INTA, 1990; (*) análisis de suelo correspondiente a muestra de los 2 cm superficiales.

DISEÑO EXPERIMENTAL DE LOS MUESTREOS

La medición de la erosión a campo se realizó en parcelas cuadradas de 1 ha de superficie que fue mantenida sin cobertura ni rugosidad durante todo el período de muestreo, para que se produjera la erosión potencial máxima. En los suelos loésicos (Ls) y arenosos (Ar) se efectuaron labores con rastra de discos para controlar las malezas, con un último repaso con rastra de dientes en dirección N-S, para nivelar los surcos que deja el implemento antes mencionado, y para controlar el encostramiento de la superficie del suelo.

En los sitios correspondientes a suelos terciarios (Tc) (Abra Pampa, AP; Río Mayo, RM; Pilcaniyeu, PC y Potrok Aike, PA) se efectuaron las mediciones sobre el suelo cubierto con la vegetación natural, pero con bajo nivel de cobertura que represente pastoreo. Esto se debió a que en dichas regiones no se desarrolla agricultura y por lo tanto no existen labranzas. En éstas parcelas se midieron los porcentajes de cobertura dado por la vegetación y por la presencia de gravas. En PC, se realizó el ensayo en una parcela que previamente fue sometida a una quema para disminuir la cobertura de la vegetación. En la Figura 2.2 se observa una vista general de los sitios de estudio.

En el centro de cada parcela se instaló una estación meteorológica a fin de registrar velocidad y dirección del viento, precipitación, humedad y temperatura del aire a 2 m de altura (Figura 2.3). La frecuencia de medición no fue la misma para todos los sitios, ya que ello dependió de la facilidad de acceso al lote. En los casos de Abra Pampa (AP), PA, Los Frentones (LF), las mediciones se efectuaron cada cinco minutos.

En SR los datos climáticos se evaluaron con una frecuencia de 60 minutos durante el año 2006 y de 10 minutos durante los años 2007, 2008 y 2009. En PC, se tomaron los datos climáticos cada 5 minutos hasta mayo de 2008, y en las tormentas posteriores la frecuencia fue de 30 minutos. Las mediciones en VM se efectuaron en todos los casos cada 15 minutos y de las 5 tormentas muestreadas en RM, en las dos primeras los datos climáticos son promedio de 60 minutos, mientras que las posteriores se midieron con una frecuencia de 10 minutos.



Figura 2.2. Vista general de los sitios de muestreo A) Santa Rosa, B) Los Frentones, C) Villa Mercedes, D) Abra Pampa, E) Pilcaniyeu, F) Río Mayo y G) Potrok Aike.

Se consideraron velocidades erosivas a aquellas mayores a $6,7 \text{ m seg}^{-1}$ que es la velocidad umbral del viento para los suelos del centro de la Argentina (de Oro y Buschiazzo, 2008). Las duraciones de las tormentas erosivas se calcularon en base a la sumatoria de minutos con vientos superiores a la velocidad umbral en cada evento y sitio.



Figura 2.3. Vista de la estación meteorológica portátil y sus componentes.

Colectores de partículas

Para cuantificar el material erosionado en cada tormenta y recolectarlo se utilizaron colectores BSNE (Big Spring Number Eight) diseñado por Fryrear (1986), contruidos de chapa galvanizada, de forma trapezoidal y compuestos de dos partes: una bandeja inferior que colecta la muestra y otra superior que se acopla por encima a la anterior y posee dos mallas de 0,3 y 1 mm de diámetro. Estas mallas retienen material grueso indeseable, no producido por erosión del suelo, como restos de vegetales gruesos, insectos u otras sustancias. El material entra por una boca rectangular de 2 x 5 cm, ubicada en la base menor de la bandeja superior. El flujo de aire que entra al colector sufre una disminución de su velocidad al chocar con la cara opuesta y el material transportado cae a través de las mallas a la bandeja inferior. El flujo de aire es desviado hacia la malla superior, por donde sale nuevamente.

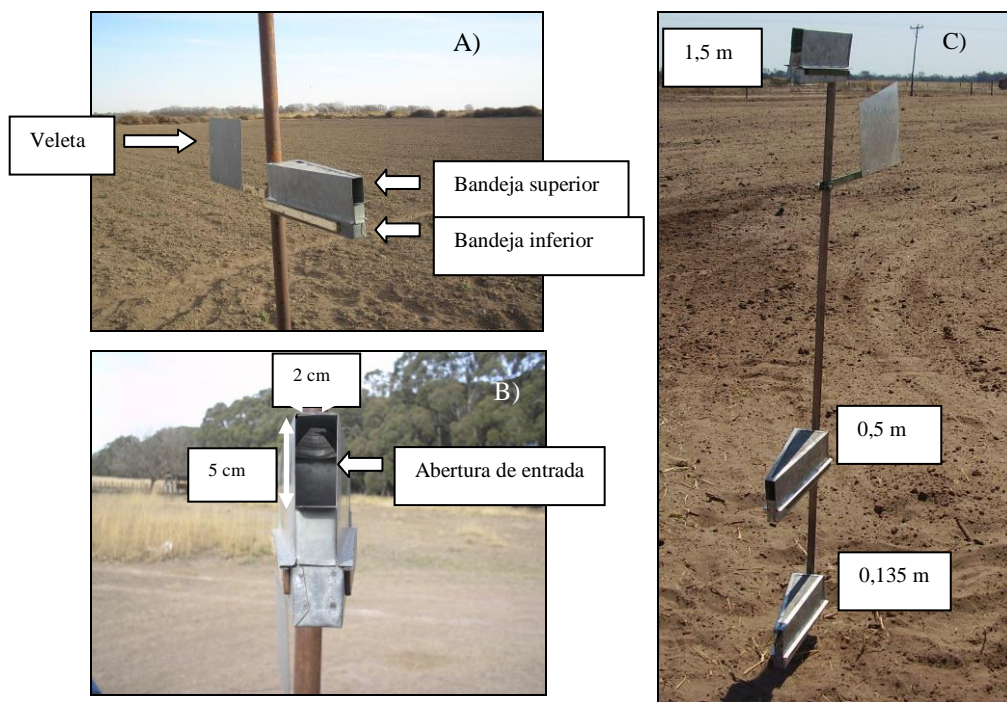


Figura 2.4. A) Estructura del colector BSNE, B) Detalle de la abertura y C) Ubicación de los colectores BSNE en cada mástil.

Estos colectores se montan en mástiles con veletas, que orienta la boca de entrada en la dirección predominante del viento y de ésta forma aumenta la eficiencia de

recolección. Captan partículas movilizadas por suspensión y un porcentaje de aquellas que lo hacen por saltación (Fryrear y Saleh, 1993), desde los 13,5 cm de altura. Estos colectores fueron testeados en túnel de viento con distintas velocidades de viento, tipo de material y rugosidad de la superficie, comprobándose que poseen una efectividad de recolección del 95%. Shannak *et al.* (2014) compararon el comportamiento de 20 diferentes colectores de partículas y comprobaron que los BSNE fueron los más eficientes en la recolección de partículas.

Los colectores se adosaron a un mástil a 13,5, 50 y 150 cm de altura (Figura 2.4). Se ubicaron cuatro mástiles en cada parcela. Cada uno en el punto medio de cada lado de la parcela (Figura 2.5).

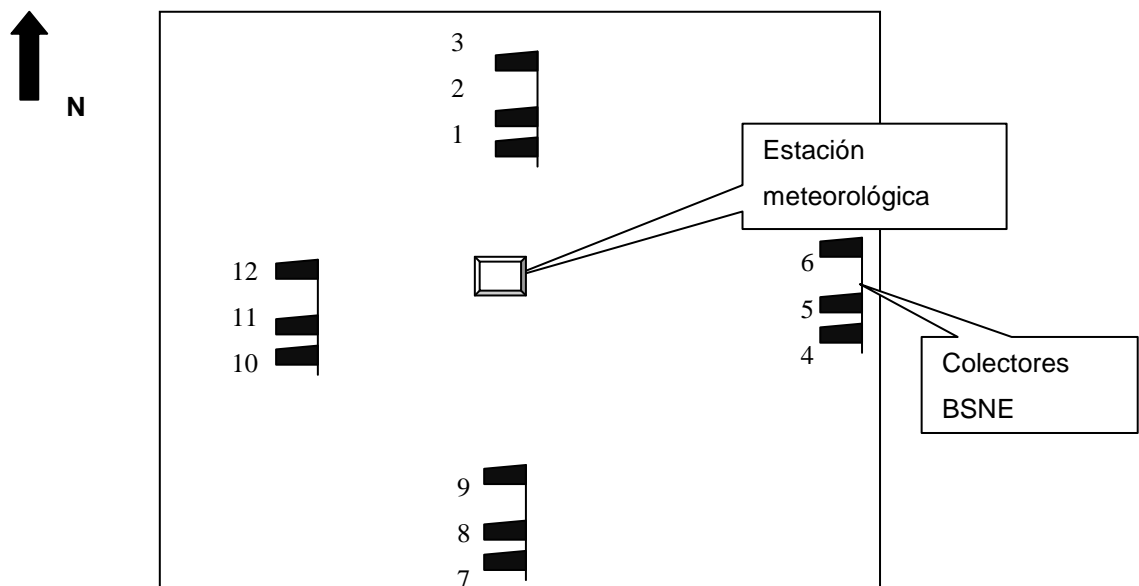


Figura 2.5. Ubicación de los mástiles con colectores y la estación meteorológica en la parcela.

Con los datos de peso del material colectado por los colectores y el de la dirección del viento predominante durante la tormenta, se calculó la cantidad del material erosionado por unidad de superficie en estudio. Para estimar la cantidad de material erosionado en cada tormenta (Q) se utilizó la fórmula desarrollada por Stout y Zobeck (1996). Estos

autores, utilizaron una ecuación modificada de la ecuación empírica ideada por Zingg en 1953, que como función lineal adopta la forma:

$$f(z)^{-1/2} = F_0^{-1/2} (1 + z/\sigma) \quad \text{Ec. [1]}$$

Donde: $f(z)$ es el flujo horizontal a la altura z

F_0 es el flujo de masa cuando la altura es igual a cero

σ es una escala de altura

La ventaja del uso de esta metodología reside en que dicho producto representa la cantidad de material que se pierde desde la altura cero hasta infinito. La Q se calculó restando al flujo de masa de los colectores ubicados a sotavento el de los ubicados a barlovento, en la dirección del viento predominante.

Se evaluó además para cada tormenta el volumen de masa que se transporta en los primeros 13,5 centímetros de altura sobre el suelo. Para ello, se calcularon los flujos de masa (FM) del material recolectado del mástil posicionado a sotavento con respecto a la dirección predominante del viento, mediante el Programa Curve Expert. La masa transportada sobre la superficie del suelo resultó de la resta del FM entre 0 y 150 cm de altura y el FM entre 13,5 y 150 cm de altura.

Recolección de muestras

Se muestrearon en cada sitio, tormentas erosivas que difirieron en el número de acuerdo a la posibilidad de acceso. En RM se muestrearon 5 tormentas, en PA 7, en PC 18, en AP 43, en VM 47, en SR 48 y en LF 138.

En cada parcela, antes del inicio del ensayo, se tomaron al azar cinco muestras de suelo de los primeros 2 cm superficiales, las cuales fueron homogeneizadas para formar una muestra compuesta.

METODOS ANALITICOS

Análisis del material erosionado

Del total de tormentas muestreadas se seleccionaron tres del sitio RM, cuatro de AP y cinco tormentas de SR, VM, LF y PC, que difirieron en cuanto a velocidad del viento y duración del evento erosivo y que tuvieron suficiente material para efectuar análisis físico - químicos. De PA sólo se pudieron determinar algunos elementos (C, N, S y P) del material obtenido a los 13.5 cm de altura, dado que no fue posible recolectar suficiente cantidad de material para efectuar otros análisis. Todos los análisis se desarrollaron sobre muestras compuestas por la mezcla de los materiales recolectados en los 4 colectores posicionados a la misma altura.

Análisis físicos

La granulometría se determinó mediante un contador de partículas modelo Malvern Mastersizer 2000. Se eliminaron los cementantes, se dispersó la muestra con ultrasonido y se determinaron las fracciones de 0 a 1 µm, de 1 a 2, de 2 a 2,5, de 2,5 a 10, de 10 a 20, de 20 a 50, de 50 a 74, de 74 a 100, de 100 a 250, de 250 a 500, de 500 a 1000 y de 1000 a 2000 µm de diámetro.

Análisis químicos

- Carbono, nitrógeno, azufre y fósforo totales (por combustión seca mediante un analizador automático, LECO CR12).

- Calcio, magnesio, potasio, cobre, cinc, manganeso, arsénico e hierro totales (por espectrofotometría de absorción atómica). La extracción de elementos totales se realizó procediendo de la siguiente forma: 0,5 g de suelo seco al aire se incineraron en mufla a 550°C durante 30 minutos. Luego se agregaron 6 ml de ácido clorhídrico al 38 % y 2 ml de ácido nítrico al 65 %, se homogeneizó la mezcla y se trató en baño de arena a 115°C durante dos horas. La solución obtenida por este proceso se llevó a 50 ml con ácido nítrico 2 M y se filtró para efectuar las determinaciones ya especificadas (Schlichting *et al.*, 1995).

Análisis del suelo original

Análisis físicos

- Granulometría (Idem punto anterior).
- Distribución de agregados mediante el uso de un tamiz rotativo vertical. Se tamizó en todos los casos durante 15 minutos y se separaron los agregados de 0 a 2 µm, de 2 a 50, de 50 a 74, de 74 a 100, de 100 a 250, de 250 a 840 y de 840 a 2000 µm de diámetro. A cada una de las fracciones se le determinó además la composición granulométrica.

Análisis químicos

- Carbono, nitrógeno, azufre y fósforo totales (Ídem punto anterior).
 - Calcio, magnesio, potasio, cobre, cinc, manganeso, arsénico e hierro totales (Ídem punto anterior).
 - A los agregados de 0 a 2 µm, de 2 a 50, de 50 a 74, de 74 a 100, de 100 a 250, de 250 a 840 y de 840 a 2000 µm de diámetro de los sitios SR y RM se les determinó:
 - carbono, nitrógeno, azufre y fósforo totales (Ídem punto anterior).

Tasa de Enriquecimiento

Se calculó la tasa de enriquecimiento (TE) comparando los porcentajes de arcilla, limo y arena del material erosionado con los de los 2 primeros centímetros del perfil del suelo. Por ejemplo:

$$TE Fr = (\% Fr M) / (\% Fr SO) \quad \text{Ec. [2]}$$

donde:

Fr = es una fracción textural determinada.

M = porcentaje en el material colectado.

SO = porcentaje en los 2 primeros centímetros del suelo original.

Se utilizó el mismo procedimiento para hallar las TE de los elementos.

Análisis mineralógico

A la fracción de 50 a 74 μm de diámetro separada con el tamiz rotativo vertical, se le determinó mediante microscopio petrográfico la morfología de las partículas y su composición mineralógica. Se estableció la presencia de agregados y de partículas minerales independientes.

Grado de Cobertura

En los sitios AP, PC, RM y PA, que fueron muestreados en condiciones naturales, se evaluó la cobertura del suelo. Se tomaron de forma aleatoria 5 fotografías digitales de la superficie del suelo desde una altura de 150 cm. Las fotografías fueron descargadas a una PC, donde se le aplicó una cuadrícula de 140 puntos de intersección utilizando el programa Paint Shop Pro 7 (Figura 2.4).

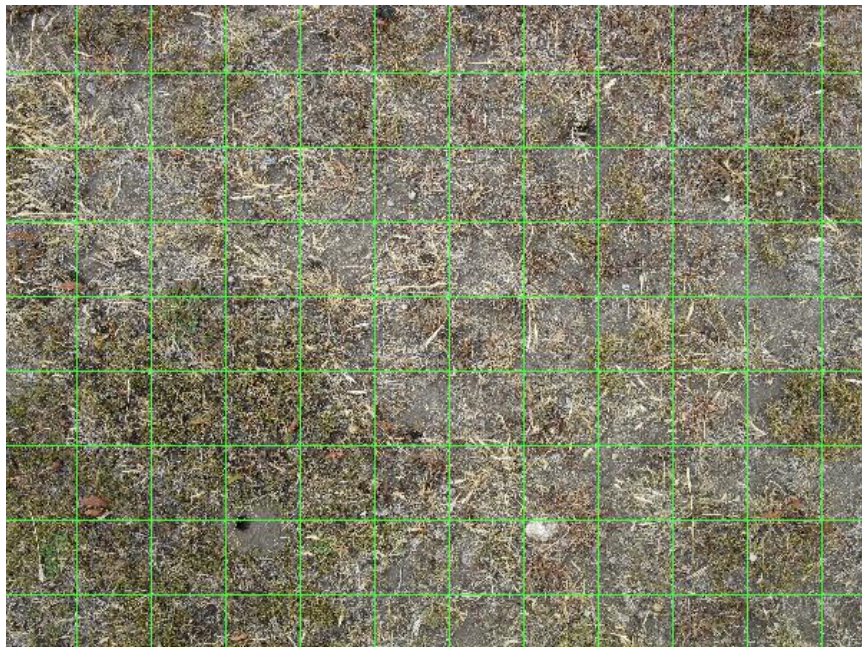


Figura 2.6. Parcela de Potrok Aike, analizada con la cuadrícula del programa Paint Shop Pro 7.

En cada punto de intersección de las líneas de la cuadrícula se evaluó la cobertura. La misma fue calculada como el porcentaje de puntos de intersección con cobertura con respecto al total de puntos de la cuadrícula. Se evaluó separadamente la cobertura vegetal y la de material detrítico. La cobertura total del suelo fue en PA (71.2%) > PC (69.7%) > RM (57.6%) > AP (52.1%).

Caracterización de la vegetación

Las distintas especies vegetales en los sitios que se muestrearon en condiciones naturales son las siguientes:

Abra Pampa: La parcela se instaló sobre un “Esporal” o pastizal de Esporo (*Pennisetum chilense*), que es una gramínea alta, perenne y rizomatoza; crece en suelos arenosos no inundables y suele estar acompañada de otras especies herbáceas: *Eragrostis nigricans*, *Hoffmannseggia gracilis*, *Aristida humilis*, y algunas subarborescentes, principalmente: *Adesmia horridiuscula* (Añagua), *Fabiana densa* (Tolilla), *Psila boliviensis* (Chijua) y *Senecio viridis* (Cabrera, 1957).

Pilcaniyeu: Predominan los coirones poa y amargo (*Poa ligularis* y *Stipa speciosa* var. *Speciosa*). En condiciones de mínimo disturbio el sitio está dominado por neneo (*Mulinus spinosum*) en el estrato arbustivo y el coirón poa en el gramíneo. Asimismo, en este estrato aparece el coirón amargo con muy baja cobertura y el coirón huecú (*Festuca argentina*) formando manchones (Lores *et al.*, 1983).

Río Mayo: Florísticamente los elementos más importantes en cuanto a arbustos son el neneo (*Mulinus spinosum*), mamuel choique (*Adesmia campestris*) y mata mora (*Senecio filaginoides*). Los espacios entre arbustos son ocupados por coirones amargos (*Stipa speciosa* y *Stipa humilis*) y coirón poa (*Poa ligularis*) (Oliva *et al.*, 2001).

Potrok Aike: Esta área está conformada por un extenso pastizal dominado por el coirón fueguino (*Festuca gracillima*), con coberturas de hasta un 50-60%, que suele estar acompañado por el coirón blanco (*Festuca pallenscens*) cuando se trata de cañadones, bajos

o cubetas de deflación. La comunidad de gramíneas bajas es más diversa, siendo los gramínoideos del género *Carex* las más importantes como forraje. Es común la presencia de algunos arbustos aislados de calafate (*Berberis buxifolia*) o mata negra (*Junielia tridens*) (Oliva *et al.*, 2001).

Erosividad climática

La erosividad climática fue determinada mediante el factor C con la metodología propuesta por Lyles (1983):

$$C = 386 (\bar{U}_z^3 / \sum_{i=1}^{12} 10(P-E)_i) \quad \text{Ec. [3]}$$

donde \bar{U}_z es la velocidad media anual de viento a 10 m de altura, expresada en m/s, "i" representa cada mes y;

$$10(P-E) = 115 \left[\frac{P/2,54}{1,8T+22} \right]^{10/9} \quad \text{Ec. [4]}$$

$P \geq 1.27 \text{ cm}; T \geq -1.7 \text{ }^\circ\text{C}$

donde P es la precipitación media mensual y T es la temperatura media mensual.

Análisis de emisión de PM₁₀

Este análisis se efectuó en túnel de viento con los suelos de los sitios SR, AN, VM, AP, PC, RM y PA. El ensayo también se realizó con el suelo de LF, pero los datos no han sido analizados en el presente trabajo dado que tuvieron que ser descartados. La condición de humedad ambiente al momento de procesar la muestra de LF, fue más elevada que la estipulada por el método. La variación entre la humedad ambiente al momento de procesar la muestra de LF con la que humedad existente para los demás sitios, no permitió la comparación entre ellos.

Para evaluar la emisión de PM₁₀ se realizaron ensayos en el túnel de viento del Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Müncheberg, Germany

(Figura 2.7). Este túnel de viento tiene sección de trabajo de 8 m de largo, 0,7 m de ancho y 0,7 m de alto. El generador de polvo se colocó en la parte superior al comienzo del túnel (Figura 2.8 B) y al final de la sección de trabajo se colocó el monitor polvo (Grimm #107 Spectrometer) (Figura 2.8 C). El generador de polvo presenta una cinta transportadora que introduce la muestra de suelo en el interior del túnel de viento.

La velocidad del viento que se utilizó durante cada ensayo fue de 3 m s^{-1} , dado que dicha velocidad permitió que las partículas mayores a $40 \text{ }\mu\text{m}$ de diámetro sedimenten antes del final del túnel de viento, donde se encontró instalado el monitor de polvo. Esto aseguró que el monitor de polvo midiera únicamente la concentración de las partículas de $0,3$ a $30 \text{ }\mu\text{m}$ de diámetro, las cuales fueron registradas cada 6 segundos durante los 6 minutos que duró cada ensayo. La concentración de las partículas menores de $10 \text{ }\mu\text{m}$ fue dada de forma automática en la hoja de cálculo del espectrómetro.



Figura 2.7. Vista general del túnel de viento del Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Müncheberg, Alemania.

Previo a los ensayos en el túnel de viento, todos los suelos fueron tamizados con tamiz de 2 mm y secados al aire bajo condiciones controladas ($21 \text{ }^\circ\text{C}$ y 60% de humedad relativa). Luego las muestras tamizadas se sometieron a las siguientes tratamientos: secado en estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ (S105), $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (S60), $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (S40), secados al aire (SA) y suelo humedecido con agua destilada hasta lograr distintos contenidos de humedad (Suelo

húmedo, SH1, SH2, SH3). Las muestras de suelo se humedecieron hasta que mostraron un contenido diferente de humedad, siendo la máxima humedad testada aquella donde el suelo dejó de emitir PM_{10} (humedad umbral de emisión). Las muestras de suelo correspondiente a cada tratamiento fueron almacenadas herméticamente en un erlenmeyer por 24 horas (Figura 2.8.A) y luego usadas en los ensayos en túnel de viento para medir la emisión de PM_{10} . El contenido de humedad en las muestras fue calculado sobre la base del suelo S105, utilizando la siguiente ecuación:

$$H = \left(\frac{S_x - S_{105}}{S_{105}} \right) \times 100 \quad \text{Ec. [5]}$$

donde H es la humedad del suelo en porcentaje, S_x peso del suelo para el tratamiento x en gramos y S_{105} peso del suelo para el tratamiento de secado a 105 °C, en gramos.

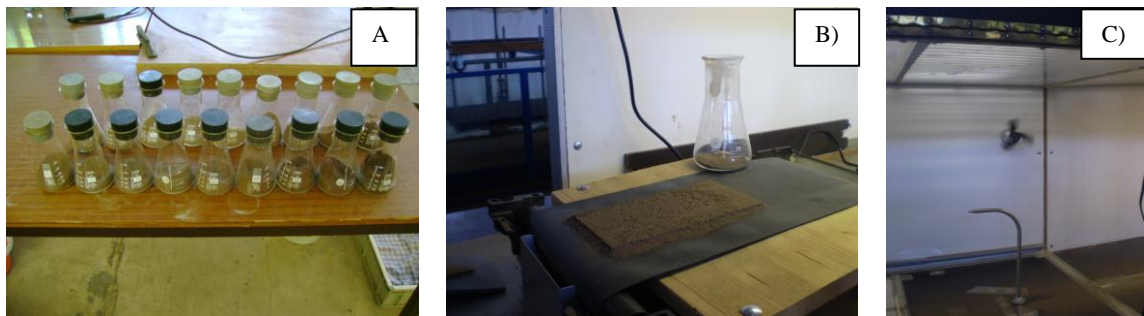


Figura 2.8. Vista de: A) muestras envasadas a distintas humedades para la determinación, B) cinta transportadora con muestra, previo al inicio del ensayo, C) monitor de polvo Grimm #107 Spectrometer.

Las muestras de suelo se colocaron en un plato de 0,5 cm de espesor y 10 x 20 cm (totalizando un volumen de 100 cm³) el cual se encontró sobre una cinta transportadora ubicada en el parte superior del túnel de viento y al inicio del mismo (Figura 2.8 B). Las muestras de suelos se cubrieron con un cobertor plástico para evitar la pérdida de humedad durante el periodo de medición. Después de comenzar el experimento, la cinta transportadora, llevó la muestra de suelo hasta el borde de la misma por donde comenzó a caer el suelo hacia el interior del túnel de viento, a una tasa constante durante 6 minutos,

tiempo que duró cada determinación. La cantidad de suelo aplicado fue determinado por la diferencia entre el peso de suelo al inicio y al final del ensayo.

Las partículas más finas del suelo fueron transportadas por la corriente de aire, a velocidad de 3 m s^{-1} , hasta el monitor de polvo el cual registró la concentración de PM_{10} (Figura 2.8 C). La emisión de PM_{10} fue calculada con la siguiente ecuación:

$$ETPM_{10} = \frac{SAF \cdot c \cdot V}{m} \quad \text{Ec. [6]}$$

donde, $ETPM_{10}$ es la emisión total de PM_{10} ($\mu\text{g g}^{-1}$), V es el volumen de aire que pasa a través de le túnel de viento durante los 6 minutos que duro cada ensayo (m^3), m es la cantidad de suelo utilizada (g), c es la concentración promedio de las partículas finas medidas durante los 6 minutos que duró el ensayo ($\mu\text{g m}^{-3}$) y SAF es un factor de corrección para la variabilidad especial de la concentración de polvo dentro de la sección transversal del túnel de viento (0,35, Funk *et al.*, 2008).

Análisis morfológico de partículas PM_{10}

Se determinó mediante microscopio electrónico de barrido, la morfología de agregados y/o partículas PM_{10} . Para recolectar las partículas se utilizó un generador simple de polvo diseñado por Méndez *et al.*, 2013 (Figura 2.9).

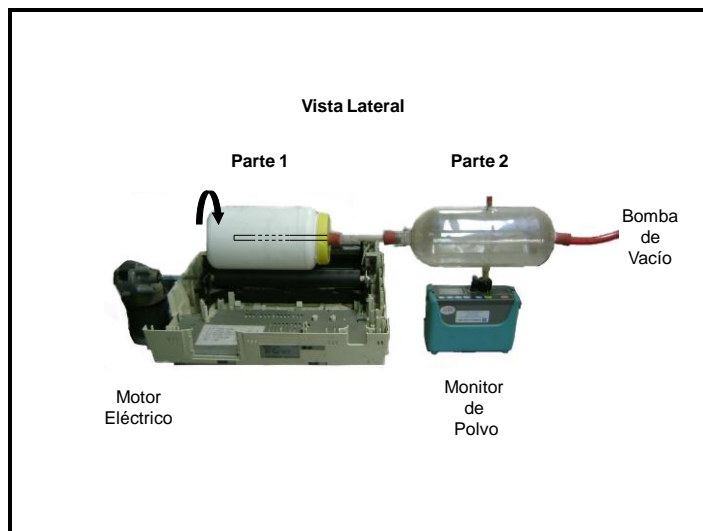


Figura 2.9. Generador simple de polvo.

Se introdujo en la primera cámara, generadora de polvo (CG), una muestra de 1,5 g de suelo tamizado por 0,5 mm y se encendió el monitor de polvo, la bomba de vacío y el motor eléctrico durante 5 minutos. Las paletas que se encuentran dentro de la CG elevan la muestra de suelo que al caer liberan las PM_{10} sueltas y se generan nuevas PM_{10} producto de la coalición entre los granos de suelo y de éstos contra las paredes del generador. El aire cargado de partículas PM_{10} entra al tubo plástico, que se encuentra en el interior de la CG, continua por el tubo de vidrio hasta la segunda cámara, que es la de concentración de polvo (CP), donde el monitor de polvo toma una muestra de aire a través del tubo plástico que atraviesa la cámara transversalmente. El monitor de polvo registró cada 6 segundos la concentración de PM_{10} en miligramos por metro cúbico de aire y además recolectó en un filtro colocado a tal fin, las partículas PM_{10} . El aire remanente, que quedó en la CP fue expulsado al exterior por la bomba de vacío que dirigió la circulación de aire en el sistema. Las partículas retenidas en los filtros fueron fotografiadas con el fin de estudiar la morfología.

Distribución de las partículas en túnel de viento

En el túnel descrito en el punto anterior, se efectuó un estudio de la sedimentación de partículas a través del mismo. Se utilizó la misma metodología que la ya descrita, con muestras de suelo secas al aire. Finalizada cada simulación se procedió a recolectar en seis tramos, el total del suelo sedimentado, el cuál fue pesado. El primer tramo (T1) corresponde a la superficie que abarca desde 0 a 130 cm de largo, el T2 de 130 a 260 cm, el T3 de 260 a 390 cm, el T4 de 390 a 520 cm, el T5 de 520 a 650 cm y el T6 de 650 a 800 cm de longitud. A la muestra obtenida en cada tramo se le determinó granulometría, mediante el contador de partículas Malvern Mastersizer 2000. No se eliminaron los cementantes ni se dispersó la muestra. Se determinaron las fracciones de 0 a 1 μm , de 1 a 2, de 2 a 2.5, de 2.5 a 10, de 10 a 20, de 20 a 50, de 50 a 74, de 74 a 100, de 100 a 250, de 250 a 500, de 500 a 1000 y de 1000 a 2000 μm de diámetro.

Análisis de los resultados

Los datos obtenidos en el ensayo experimental fueron analizados estadísticamente mediante regresiones simples y múltiples. También se realizaron Test de diferencias de medias mediante el Programa Excell e InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MAGNITUD DE LA EROSION EN LOS SITIOS DE MUESTREO

Las mayores pérdidas de suelo por EE se produjeron en los suelos Ls (Figura 3.1, Anexo 1). En SR en el evento erosivo del 19 de enero de 2006 se perdieron 15041,2 kg ha⁻¹. Los otros eventos erosivos con mayores pérdidas para SR fueron el 3 de diciembre de 2009 con una magnitud de 5581,2 kg ha⁻¹ y el 5 de septiembre de 2007 donde se erosionaron 4647,6 kg ha⁻¹. Las menores Q fueron de 0,24 kg ha⁻¹ y correspondieron a tormentas con bajas velocidades máximas en período de excedencia (VMaPE, Anexo 1). En LF la mayor pérdida de suelo ocurrió el 18 de agosto de 2009 con una erosión de 4999,2 kg ha⁻¹. Las pérdidas anuales de suelo para SR en los años 2006, 2007, 2008 y 2009 fueron de 25,4, 5,7, 1,0 y 7,6 Mg ha⁻¹ respectivamente.

En LF hubo 138 eventos erosivos en los 4 años analizados, de los cuáles la gran mayoría (el 59 %) correspondieron a Q de menos de 100 kg ha⁻¹. En 11 eventos erosivos (8% del total) las magnitudes erosionadas superaron los 1000 kg ha⁻¹ de pérdida de suelo. Las pérdidas anuales de suelos en LF en los años 2007, 2008, 2009 y 2010 fueron de 6,9, 6,7, 27,1 y 3 Mg ha⁻¹ respectivamente.

En el suelo Ar (VM) las pérdidas de suelo fueron desde 0,7 a 1104 kg ha⁻¹ por evento erosivo. La sumatoria de los Q durante 2008 en VM fue de 3,6 Mg ha⁻¹. Estos datos hallados para los Ls y Ar coinciden con los hallados en otros trabajos donde se evaluaron también suelos loésicos. El Departamento de Agricultura de EEUU estimó en el año 2007 que las tierras cultivadas de las planicies se erosionaron en promedio 4,7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (USDA–NRCS, 2007). En China en tanto, en suelos loésicos cultivados de regiones semiáridas, se estimaron pérdidas anuales entre 14 y 41 Mg ha⁻¹ año⁻¹, valores de 2 a 4 veces más altos que los medidos en suelos con pasturas naturales (Dong and Chen, 1997). Yan *et al.*, (2001) mediante Cs¹³⁷ evaluaron en el Pateau de Qinghai-Tibet pérdidas de 31 Mg ha⁻¹ año⁻¹ y en la Provincia de Shanxi (norte de China), tasas de erosión de alrededor de 30 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en suelos con labranza convencional (condición semejante al del presente

En los suelos Tc las pérdidas de material por EE fueron menores que para los suelos Ls y Ar. En la Puna (AP), durante el evento erosivo del 19 de septiembre de 2012 se erosionaron 2091,3 kg ha⁻¹ de material. La magnitud de suelo erosionado ese año fue de 2,3 Mg ha⁻¹, por lo cual en los restantes eventos erosivos se perdieron sólo 0,2 Mg ha⁻¹. En efecto, los Q en el 95 % de los eventos en AP, no superaron los 50 kg ha⁻¹. En los suelos Tc de la Patagonia, las pérdidas por EE fueron aún menores. Los mayores Q por evento en esos sitios fueron: en PC de 858,2 kg ha⁻¹ (el 29 de diciembre de 2010), en RM de 296,3 kg ha⁻¹ (el 9 de noviembre de 2008) y en PA de 41,0 kg ha⁻¹ (el 14 de diciembre de 2010), (Figura 3.1). Esto indica que las pérdidas por EE son menores en los suelos Tc que las halladas en los otros sitios. De acuerdo a las características climáticas de los sitios (Tabla 3.1), los resultados debieron ser opuestos.

Los suelos Ls y Ar situados en lugares con menor velocidad promedio de viento, tuvieron mayores pérdidas de suelo por EE, lo que indicaría una influencia de las características intrínsecas del suelo. Chepil (1945) demostró que suelos de texturas medias producen mayor proporción de partículas movilizadas por suspensión y que la agregación del suelo aumenta el tamaño de las partículas finas e incrementa el movimiento por rodadura y saltación. Por ello, suelos mejor estructurados como el de SR podría tener mayor pérdida de material. Las parcelas de los Ls y Ar, han sido laboreadas durante el ensayo, lo que ha provocado variaciones de las condiciones de la superficie del suelo, como pequeños cambios en la rugosidad, en la agregación o aparición de encostramientos, que podrían alterar el perfil del viento y por ende modificar las pérdidas de suelo (Shao, 2005). Por efecto de las labranzas y por el impacto de las gotas de lluvia, los agregados no erosionables (mayores a 0.84 mm de diámetro) se pueden transformar en agregados erosionables, por la abrasión que se produce cuando las partículas son puestas en movimiento (Colazo y Buschiazzo, 2010). Esto incrementaría la cantidad de material transportable en futuros eventos erosivos, principalmente en las condiciones de los sitios Ls y Ar.

En los Ls, las pérdidas anuales de suelo superan ampliamente los valores que son considerados como tolerables. Chepil (1958a) consideró la pérdida tolerable de suelo 8 a 12 Mg ha⁻¹ año⁻¹ de acuerdo al tipo de suelo.

Tabla 3.1. Características climáticas de los sitios estudiados.

Sitio	Condiciones climáticas			
	(medias anuales)			
	Pptac. (mm)	Temp. (°C)	Veloc. (km h ⁻¹)	Dirección del viento
Los Frentones	850	20,7	9,3	NE-SW
Santa Rosa	830	15,4	11,5	N-S
Villa Mercedes	763	15,4	11,7	NE-SW
Abra Pampa	337	7,8	19,1	NE-SW
Pilcaniyeu	268	7,7	22,2	W-SW
Río Mayo	200	9,5	29,5	SW
Potrok Aike	300	7,0	35,8	W-SW-NW

Sin embargo, estudios recientes han modificado el concepto de erosión tolerable, proponiendo que las tasas actuales de pérdida de suelos debería ser cualquier tasa de erosión real en la que no se produzca el deterioro o pérdida de alguna de sus funciones (Verheijen *et al.*, 2009). Estos autores establecieron que debe existir un equilibrio entre las tasas de erosión y la formación de suelos más el aporte de sedimentos que recibe el suelo desde fuentes externas por arrastre eólico o hídrico. Indicaron, para Europa, un límite tolerable de erosión de 1,4 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Si se considera éste último valor, las pérdidas por EE en LF y SR superan dicho límite.

En la Patagonia se localizan los sitios con mayor erosividad climática, la que aumenta de norte a sur, ya que en PC (56) < RM (168) < PA (188). Sin embargo, se produjeron las menores pérdidas de suelo y las mismas se ordenaron a la inversa, ya que la EE fue en PC > RM > PA. Estos sitios y AP poseen una cobertura generada por vegetación natural y por material detrítico. En la Tabla 3.2 se observa el porcentaje de cobertura del suelo (nivel de protección de suelo) con vegetación y rodados para cada sitio. La menor EE en los Tc podría deberse a la presencia de cobertura vegetal que desplazaría el perfil del viento hacia arriba, disminuyendo la cantidad absoluta de material erosionado e incrementando la cantidad de partículas movilizadas por suspensión (Hoffmann *et al.*,

2008). En éstos sitios la EE llegaría a ser el principal riesgo de degradación en caso en que se remueva la vegetación mediante sobrepastoreo u otras actividades antropogénicas (Sterk *et al.*, 2012) o por el simple reemplazo de vegetación perenne por anual (Belnap *et al.*, 2009). En esa situación, de remoción de la cobertura vegetal, PA presentaría mayor degradación, dado que la cobertura con rodados fue mínima (0.7 %). PC y RM en tanto, presentaron semejantes porcentajes de suelo cubierto con vegetación y material detrítico, por lo cual estarían parcialmente protegidos. En AP una reducción en la cobertura vegetal no incrementaría significativamente la EE ya que es de sólo un 10 %. Allí la cobertura está dada principalmente por las gravas sobre la superficie, pero a diferencia de los otros sitios son de muy pequeño tamaño (la mayor parte entre 2 y 5 mm de diámetro). No se cuenta con un muestreo anual para PA, PC y RM a fin de establecer si se produce erosión dentro de límites tolerables, pero los principales eventos muestreados dan indicios de baja EE. Las pérdidas de suelo en AP durante 2012 ($2,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) fueron menores a los totales anuales erosionados en SR y LF. Semejantes resultados fueron hallados por Biielders *et al.* (2002) quienes determinaron en suelos arenosos que, la EE puede provocar pérdidas sustanciales de suelo con manejos tradicionales, predominantemente por el movimiento de saltación. En tanto, con presencia de vegetación natural, las partículas movilizadas son atrapadas eficientemente por la misma, provocando menores pérdidas.

Tabla 3.2. Porcentaje de la superficie del suelo cubierta con vegetación natural y con rodados en Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Sitio	AP	PC	RM	PA
Cobertura con vegetación (%)	10,0	35,2	27,4	70,5
Cobertura con rodados (%)	42,1	34,5	30,2	0,7
Cobertura Total (%)	52,1	69,7	57,6	71,2

En la Figura 3.2 está representada la proporción de material que se erosiona a los 13,5, 50, y 150 cm de altura. Cada barra representa el promedio del material erosionado en todos los eventos erosivos de cada sitio. A los 13,5 cm de altura, se hallaron diferencias

significativas entre PA y los restantes sitios. En PA y PC se movilizó la menor proporción de material, el 60 y 70 % respectivamente del total. Estos dos sitios se diferenciaron significativamente de los Ls y Ar. En VM, SR y LF se movilizó la mayor proporción de material, siendo para el último sitio de un 89 % de material. Los Ls y Ar no se diferenciaron significativamente de RM y AP. Tampoco se hallaron diferencias entre RM y AP con PC ($n= 295$; $p<0.001$). En los Ls y Ar, se halló la mayor proporción de partículas movilizadas a 13,5 cm, debido a la condición de superficie sin cobertura ni rugosidad y se diferenció de PA y PC, ya que en estos sitios la cobertura del suelo disminuyó la movilización de material a esa altura. El material movilizadado en AP y RM, si bien fue menor que en los Ls y Ar, no se diferenció estadísticamente ya que son los Tc con menores porcentajes de cobertura.

A los 50 cm se halló mayor proporción de material en los Tc y menor proporción en los Ls y Ar, aunque sólo se hallaron diferencias significativas entre el suelo con menor proporción de material (LF, 8%) respecto al de mayor proporción (PA, 28%) ($n= 295$; $p<0.001$). La misma tendencia se halló a los 150 cm, donde las proporciones de material variaron entre 5% (LF) y 12 % (PA).

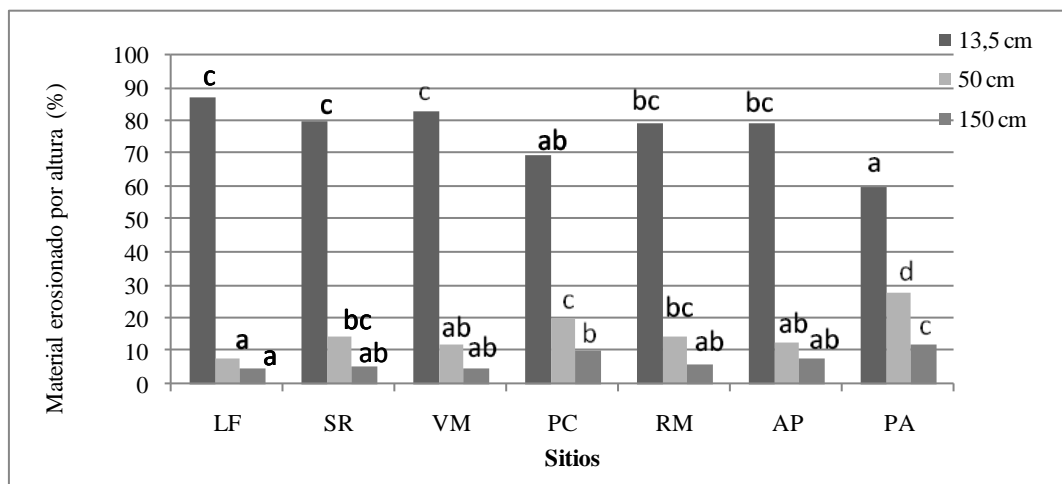


Figura 3.2. Proporción de material erosionado a las alturas de 13,5, 50 y 150 cm, en los sitios estudiados. (Medias con una letra común no son significativamente diferentes, $p<0.05$).

Estos resultados indicarían que en los Tc habría una mayor proporción de material que se moviliza a mayor altura por suspensión que en los Ls y Ar. La presencia de cobertura vegetal desplazaría el perfil del viento hacia arriba, produciendo un incremento

en la cantidad de partículas movilizadas por suspensión (Hoffmann *et al.*, 2008). Además, un mayor porcentaje de cobertura del suelo, provocaría que una mayor proporción de material se mueva por suspensión (Figura 3.3). El movimiento de suspensión provocará una mayor producción de partículas finas que estaría directamente relacionada con el potencial del suelo a producir polución de la atmósfera y de acuerdo a estos resultados sería más importante en los Tc. En los Ls y Ar en tanto, habría un mayor movimiento cerca de la superficie del suelo. Semejantes resultados fueron hallados en otro estudio efectuado en Argentina. Los autores demostraron que en Hapludoles con manejo agrícola, existe un mayor transporte por saltación por lo que se ve afectada mayormente la calidad del suelo. En suelos menos evolucionados (Ustipsammentes y Haplustoles) y con manejo agrícola, existe tanto degradación del suelo como del ambiente. En tanto, en ambientes con altas velocidades de viento (Patagonia), con suelos como los Haplargides con manejos pastoriles que mantienen coberturas permanentes de pastos, la EE afectaría relativamente más a la calidad del aire (Buschiazzo *et al.*, 2009).

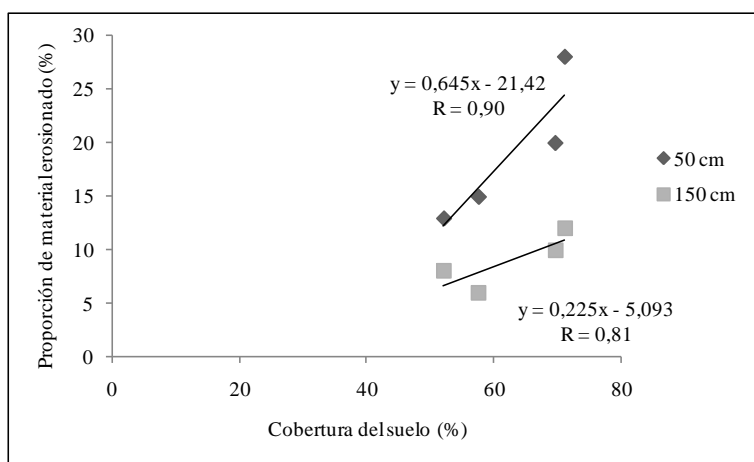


Figura 3.3. Proporción de material erosionado a 50 y 150 cm de altura en relación al porcentaje de cobertura de los suelos Tc.

Relación entre magnitud de la erosión y parámetros climáticos

No se halló ningún ajuste al considerar los Q de la totalidad de los eventos erosivos y parámetros climáticos. Si bien algunos autores encontraron que la capacidad de

transporte de partículas está relacionada con la velocidad del viento al cubo (Bagnold, 1941) o con el cubo de la diferencia entre la velocidad media y la velocidad umbral, no se halló relaciones utilizando la velocidad promedio (V_p), Velocidad media en período de excedencia (V_{mPE}), V_{MaPE} y duración de las tormentas. Tampoco se encontró correlaciones utilizando un factor que incluyera la velocidad del viento, al igual que lo informado por Fryrear (1995) para mediciones a campo en EEUU. La falta de correlación entre Q y parámetros climáticos puede deberse a la influencia de las características superficiales del suelo, dado que un fuerte incremento en la velocidad umbral decrecerá la masa de suelo que podría ser transportada. Variaciones en la humedad del suelo también pueden hacer variar la relación con la velocidad o duración del evento erosivo. Si los contenidos de humedad varían, las partículas secas son más susceptibles a ser transportadas, pero ello dependerá de la textura del suelo, ya que las más extremas son más erosionables (Bisal and Hsieh, 1966). La retención del agua en el suelo consiste en la absorción molecular en la superficie de las partículas y fuerzas capilares entre las partículas (Fécan et al., 1999), por lo que vientos de gran intensidad podrían transportar baja cantidad de material, como ocurre en PA. A pesar del control periódico en las parcelas de Ls y Ar, puede producirse un cambio temporal por la formación de una costra superficial, luego de una precipitación. En ese caso se reduce la erosionabilidad del suelo (Chepil, 1958b).

En la Tabla 3.3 encuentran los Q y los parámetros climáticos de los eventos erosivos seleccionados en cada sitio, para su estudio en mayor detalle (En el Anexo 1 se encuentran los parámetros de todos los muestreos). En este caso y para este grupo reducido de eventos erosivos, se hallaron correlaciones entre el Q y la V_{MaPE} (Figuras 3.4 A y B). No pudieron encontrarse relaciones con otras variables como V_p , V_{mPE} , duración del evento erosivo, o combinaciones entre ellas. Es decir, que las velocidades máximas alcanzadas en el periodo de tiempo en que el viento supera la velocidad umbral, sería determinantes en los Q para cada sitio. Se obtuvieron dos ajustes, uno lineal para los suelos Ls-Ar ($n= 12$ $p< 0,05$) y otro potencial para los Tc ($n= 15$ $p<0,001$). Cuando en los Tc se incluye la tormenta del 19/09/2012 de AP que fue la de mayor erosión para ese tipo de suelos, la relación continua siendo potencial pero a una probabilidad más baja ($p< 0,05$).

Tabla 3.3. Cantidades erosionadas, parámetros climáticos y flujo de masa de 0 a 150 y de 13,5 a 150 cm de altura de los eventos erosivos seleccionados de los sitios de estudio.

Sitio	Fecha	Q	Dir.	Vp	VmPE	VMaPE	Durac.	FM ₀₋₁₅₀	FM _{13,5-150}
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	minutos	(kg m ⁻¹)	(kg m ⁻¹)
LF	04/09/07	483,87	NW	16,0	29,5	35,8	1515	15,34	5,45
LF	01/12/07	342,95	NE	8,5	21,4	25	295	2,29	1,15
LF	22/09/08	331,88	SW	4,6	19,3	22,6	15	14,59	4,44
LF	07/10/08	1740,26	SE	8,7	22,6	27	795	22,42	15,71
LF	26/12/08	511,99	SW	6,4	21,3	23,9	190	9,58	3,63
SR	19/01/06	15041,16	NNE	11,4	28,0	42,7	1287	163,1	69,43
SR	03/09/08	380,70	SW	14,7	25,4	36,0	1230	4,07	2,05
SR	10/10/08	146,90	NE	24,6	26,8	34,6	3505	2,32	1,51
SR	19/11/09	1596,43	SW	25,0	26,5	39,4	380	41,13	9,77
SR	03/12/09	5581,19	SW	18,0	27,6	38,6	810	133,84	30,82
VM	14/12/07	846,12	NW	7,7	11,4	21,7	1725	16,24	8,33
VM	17/12/07	81,10	NE	7,2	12,4	20	2055	4,41	1,99
VM	07/01/08	340,60	SW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6,27	2,73
VM	13/01/08	115,09	NE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2,57	1,31
VM	22/01/08	305,10	SW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10,26	3,95
AP	17/10/11	13,58	S	12,9	27	36,7	4145	0,29	0,11
AP	04/11/11	21,76	S	9,2	24	27,5	2645	0,34	0,13
AP	11/11/11	226,15	E	8,8	25,2	29	1185	2,51	1,12
AP	14/11/11	21,70	S	12,1	25,5	30,3	855	0,43	0,17
PC	18/12/07	77,59	W	17	25,8	33,9	7460	2,77	1,49
PC	16/01/08	27,54	W	17,9	25,9	34,6	6730	4,85	2,94
PC	14/02/08	67,44	NW	12,9	23,3	29,1	5895	1,77	1,06
PC	04/02/10	198,35	W	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3,82	2,90
PC	02/03/10	374,88	W	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7,47	5,01
RM	14/10/08	152,73	SW	9,2	23,2	32,8	2340	2,09	0,96
RM	09/11/08	296,25	SE	11,8	23,2	33	2000	3,62	1,83
RM	23/01/09	92,05	SE	11,2	23,6	29,4	2760	1,00	0,59
PA	22/01/10	2,01	SE	45,8	45,8	61,9	745	0,02	0,01
PA	24/01/10	6,90	NE	44,2	44,2	58,6	625	0,08	0,04
PA	26/01/10	1,30	NE	42,9	42,9	58	715	0,02	0,01
PA	04/12/10	1,97	SW	38,9	289	52,7	1445	0,04	0,03
PA	14/12/10	40,95	NE	34,2	39,5	48,3	1235	0,42	0,23

Q: Material erosionado, VP: velocidad promedio, VmPE: Velocidad media en período de excedencia, VMaPE: velocidad máxima en período de excedencia y FM: flujo de masa.

Para los Ls-Ar la relación es positiva, es decir que a medida que aumenta la VMaPE, aumentan los Q, al igual que la correlación hallada en el noreste de la meseta de Qinghai-Tíbet, en China (Qiang *et al.*, 2007). Estos resultados difieren con otros hallados para la RSPC donde se había encontrado que la duración de los eventos erosivos explicaba el 40 % de la variación en la pérdida de suelo por EE y se había podido establecer una correlación significativa entre Q la velocidad promedio (Aimar *et al.*, 2011). En tanto para los Tc, la función fue potencial y negativa, debido que en PA que es el sitio de suelos Tc con vientos más erosivos, se obtuvieron las menores pérdidas de suelo debido a su alta cobertura.

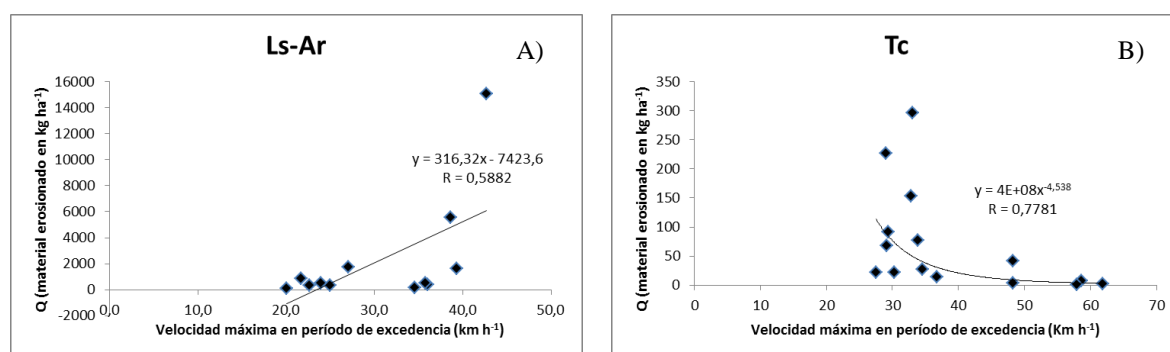


Figura 3.4. Relación entre material erosionado (kg ha⁻¹) y velocidad máxima en período de excedencia (km h⁻¹), para las tormentas seleccionadas de los suelos A) arenoso y loésicos y B) terciarios.

Material erosionado sobre la superficie del suelo

Por lo expuesto, los Q están relacionados a la velocidad del viento pero en forma diferente de acuerdo al origen del suelo y también fue demostrado que los Q poseen diferentes proporciones en altura. El mayor movimiento de material se produce cerca de la superficie del suelo. Stout y Zobeck (1996) establecieron que el 50 % del suelo que se erosiona se transporta en los primeros 1,7 cm sobre el nivel del mismo, por lo que consideraron que no podrían obviarse muestreos cercanos a la superficie. En suelos de la RSPC de Argentina, con la utilización de colectores de superficie y BSNE se cuantificó que el material transportado en los primeros 13,5 cm fue el 80 % del total erosionado

(Aimar, 2002). El límite entre el movimiento de suspensión y saltación no es estático dependería de la velocidad del viento y la naturaleza de la superficie y en general se halló entre 0,11 hasta 0,31 m (Fryrear y Saleh, 1993). Por lo tanto con las mediciones propuestas en este estudio se estaría evaluando parte de las partículas que se mueven por saltación y parte de las que lo hacen por suspensión. En la Tabla 3.3 se encuentran los FM de 0 a 150 cm de altura y los FM de 13,5 a 150 cm. La diferencia entre ambos representa el volumen de material erosionado que se transportaría por rodadura y saltación en los primeros 13,5 cm de altura (Figura 3.5). (En el Anexo 2 se hallan los FM para los restantes eventos erosivos). Si bien la comparación de los FM no es tan exacta como los datos obtenidos a partir de mediciones a campo con el uso de colectores de superficie (que colectan muestras a los 0, 15, 0,5 y 1,5 cm de altura) y los BSNE triples (que colectan a los 7, 12 y 22,5 cm de altura), la comparación de los FM entre sitios presenta una tendencia. A excepción de AP, probablemente por ser el sitio con menor grado de cobertura de los sitios naturales y porque la cobertura está dada por gravas finas, que permitiría un mayor movimiento por saltación, los otros suelos Tc presentan los menores valores de material movilizado sobre la superficie. En los casos de suelos Ls y Ar los porcentajes obtenidos variaron entre 55 y 60 %, en coincidencia con el análisis efectuado en los párrafos precedentes.

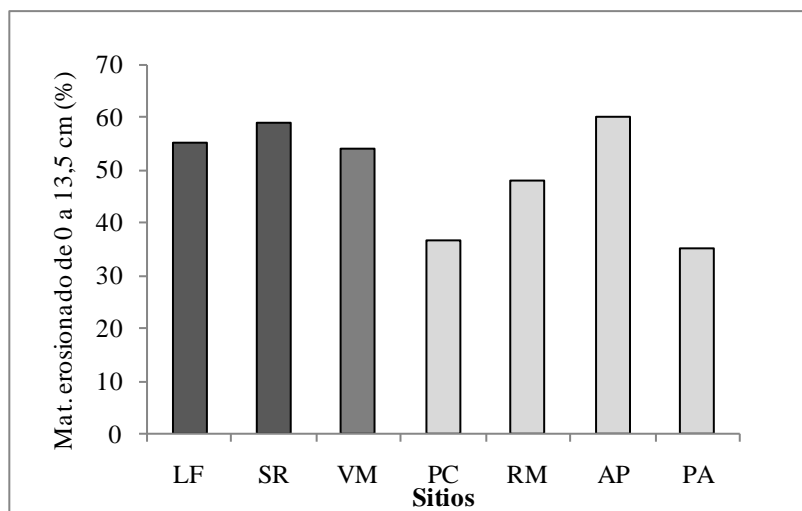


Figura 3.5. Porcentaje de material erosionado entre 0 y 13,5 cm de altura en los sitios Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Potrok Aike (PA), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP). Barras negras: suelos loésicos, gris oscuro: arenoso y gris claro: suelos terciarios.

El mayor volumen de material transportado sobre la superficie del suelo implica mayor movimiento de rodadura y saltación y la consecuente abrasión de partículas que pueden transformarse en agregados erosionables y ser erosionados por el viento en eventos posteriores.

En condiciones naturales, los suelos Ls-Ar tendrían mayor FH que los Tc que afectaría la calidad del suelo. En tanto, en los Tc existiría un mayor transporte por suspensión que afectaría a la atmósfera. No fue posible validar totalmente la **H7**. *Mayores velocidades y duraciones de las tormentas de viento incrementan la cantidad de suelo erosionado y la concentración de elementos en el material erosionado*, ya que se encontró una relación positiva entre Q y la VMaPE para los Ls y Ar, y una relación negativa para los Tc. Pero no hubo correlación entre los Q y la duración de los eventos erosivos.

Se rechaza la hipótesis **H6**. *Los suelos desarrollados sobre sedimentos terciarios, por poseer texturas más gruesas y/o estar en regiones climáticas de mayor erosividad, pierden, en términos absolutos, mayor cantidad de elementos que los desarrollados sobre loess o arenas eólicas*, dado que los suelos desarrollados sobre materiales Tc, han presentado menores Q respecto a los suelos Ls y Ar. Estas grandes diferencias obtenidas en los Q de acuerdo al tipo de suelo, arrojará mayores pérdidas absolutas de elementos en los suelos Ls, más allá de los valores relativos de dichos nutrientes en el material erosionado.

GRANULOMETRIA DEL MATERIAL

Granulometría del material erosionado

En las Figuras 3.6 se observan la proporción de partículas de diferente tamaño en el material erosionado a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en los suelos Ls y Ar y en la Figura 3.7 del material erosionado en los suelos Tc.

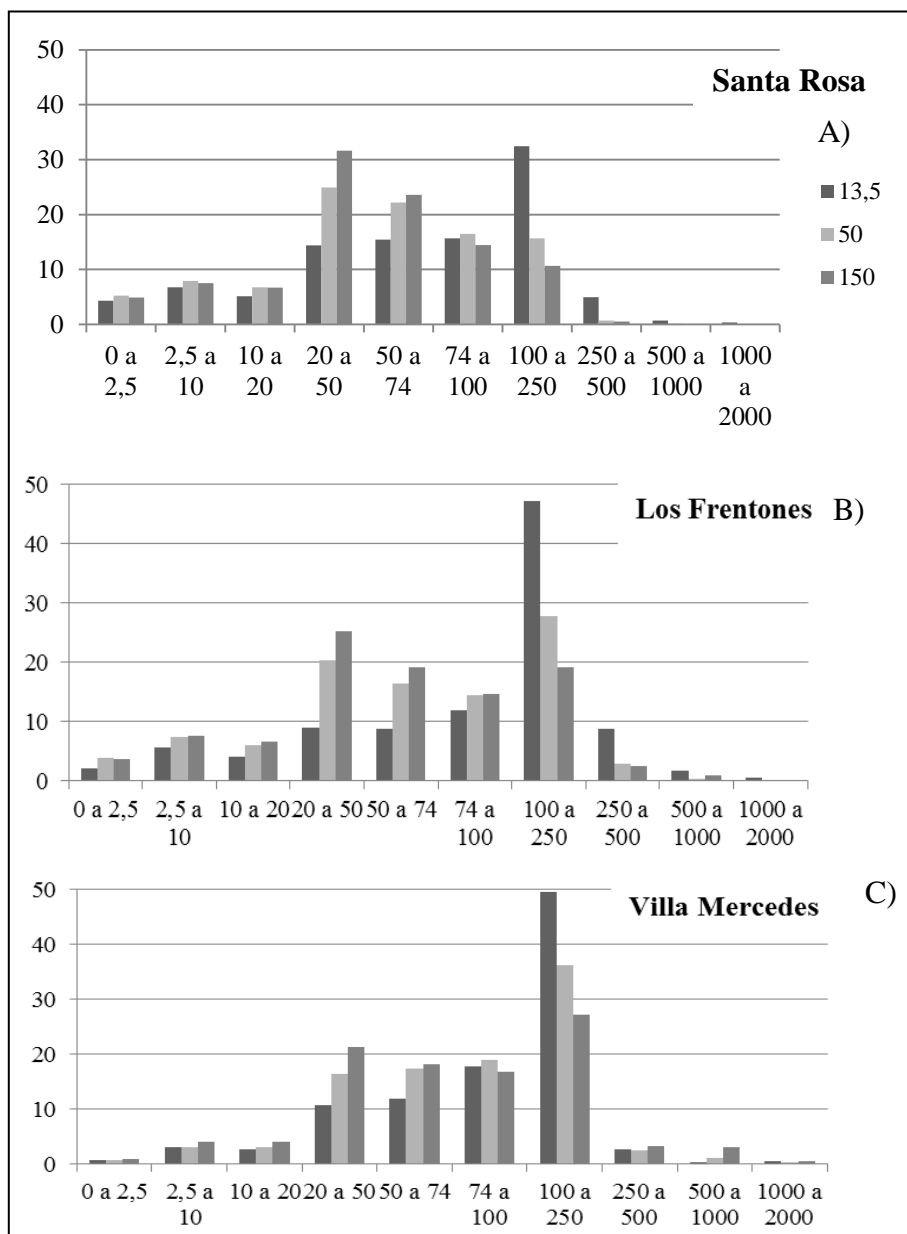


Figura 3.6. Composición granulométrica del material erosionado a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en eventos erosivos de suelos desarrollados sobre loess: A) Santa Rosa, B) Los Frentones y sobre arenas eólicas C) Villa Mercedes.

La fracción granulométrica más abundante en el material movilizado a distintas alturas fue la de 100 a 250 μm de diámetro para la mayoría de los suelos. A medida que aumentó la altura, el material resultó más fino con un marcado aumento a los 50 y 150 cm de altura de partículas menores a 74 μm de diámetro.

En todos los sitios, el material que se trasladó a los 13,5 cm de altura presentó la moda en las partículas de 100 a 250 μm de diámetro. Esta fracción de partículas representaron el 70 % de la muestra en el material erosionado de RM, valores cercanos al 50 % en VM y LF y entre 45 y 50% en AP. Los porcentajes más bajos correspondieron a PC (37%) y SR (32 %).

El material recolectado a los 50 cm también tuvo la moda en las partículas de 100 a 250 μm de diámetro en la mayoría de los suelos, la excepción fue SR cuya moda se ubicó en la fracción de 20 a 50 μm , seguida en cantidad por la fracción de 50 a 74 μm y la de 74 a 100 μm de diámetro.

A los 150 cm de altura, el material recolectado en los suelos de Ls tuvo la moda en la fracción de 20 a 50 μm de diámetro, en tanto en suelos Ar y Tc, la misma se encontró en la fracción de 100 a 250 μm de diámetro. Esto indica que a esa altura el material de los Ls estaría constituido por agregados formados por partículas más pequeñas que en los otros suelos. Qiang *et al.*, (2007) que analizando eventos erosivos en el noreste de la meseta de Qinghai-Tíbet hallaron que el material erosionado a esta misma altura, tenía predominantemente arenas con modas en 137,9 y 124,7 μm semejante al material colectado en los Ar y Tc. Lawrence y Neff (2009) en tanto, establecieron el material que se deposita localmente y que es transportado por flujo vertical estaría constituido principalmente por limos gruesos y arenas finas, semejante a los resultados hallados para los Ls. (En el Anexo 3 se encuentran los análisis granulométrico de las muestras colectadas a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en los eventos erosivos de los sitios estudiados).

En todos los suelos el material colectado a los 13,5 cm de altura tuvo menores cantidades de partículas de la fracción de 0 a 74 μm de diámetro, aumentando la proporción de dicha fracción con la altura. Para la fracción de 100 a 500 μm la tendencia fue opuesta es decir, que a los 13,5 cm se observaron las mayores proporciones de dicha fracción, la que fue disminuyendo con la altura de muestreo. Las fracciones de 74 a 100 y de 500 a 2000 μm en tanto, no presentaron una tendencia definida. Por ejemplo para SR, la

fracción de 74 a 100 μm fue más abundante a los 50 cm de altura que a los 13,5 cm, en tanto en PC y LF ocurrió lo contrario.

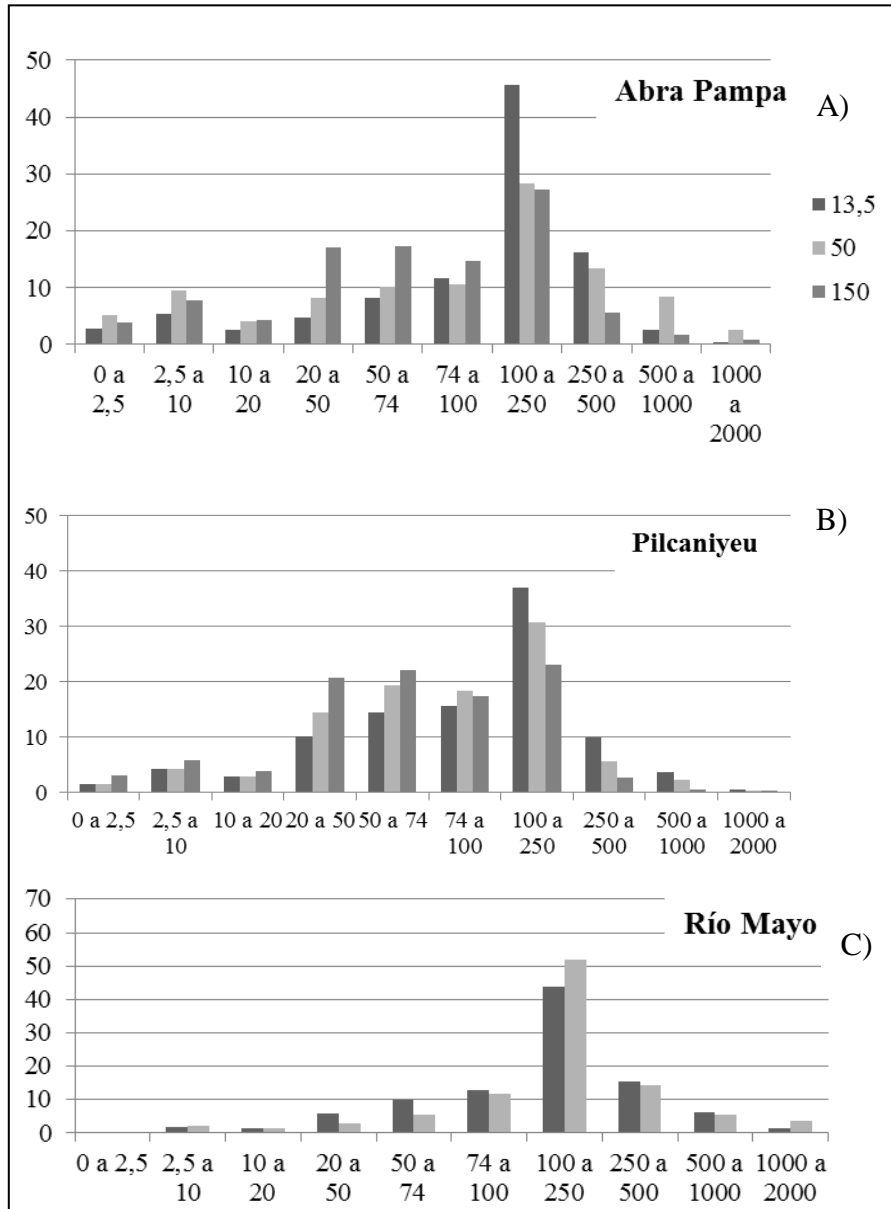


Figura 3.7. Composición granulométrica del material erosionado a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en eventos erosivos de suelos desarrollados sobre materiales terciarios: A) Abra Pampa, B) Pilcaniyeu y C) Río Mayo.

Este resultado hallado en SR, donde partículas de mayor tamaño alcanzaron mayor altura, probablemente se deba a que en el movimiento de saltación se producen rebotes de

las partículas que hacen que puedan eyectarse a mayor altura y tenga un mayor desplazamiento horizontal (Greeley *et al.*, 1996).

Las fracciones de 100 a 250 y de 250 a 500 μm de diámetro presentaron diferencias significativas entre alturas de muestreo ($N= 63$, $p<0.0001$), ya que disminuyeron en cantidad cuando la altura fue mayor. Las fracciones de 20 a 50 μm y de 50 a 74 μm de diámetro, también presentaron diferencias significativas entre alturas ($N= 63$, $p<0.0001$), pero en este caso, a mayor altura hubo mayor cantidad de estas fracciones.

El material colectado a los 13,5 cm de altura en SR (Figura 3.8 A) tuvo una textura muy semejante al del suelo original, al igual que datos reportados por otros autores (Chen y Fryrear, 1996). En LF y VM fue levemente más fino que el del suelo original (Figura 3.8.B y C). En los Tc en tanto, se encontró las mayores diferencias texturales con el suelo original (Figura 3.8.D, E y F), como lo hallado por Nishikawa *et al.* (2000) que estableció un tamaño promedio de partículas en el suelo original del desierto de Taklamakan de 130 μm y para el material transportado en las inmediaciones de 63 μm .

Frecuentemente a bajas alturas la distribución de frecuencia del tamaño de partículas es similar al del material parental (Tan *et al.*, 2014) y a medida que se incrementa en altura existe una mayor selección del material, con la moda en partículas de menor tamaño (Farrell *et al.*, 2012). La tasa de disturbios en la superficie del suelo, también provoca una mayor selección del material erosionado (Weinan *et al.*, 1998) que es lo que habría ocurrido en los suelos Ls y Ar, donde se produjeron labranzas para mantener la superficie sin rugosidad. Por otra parte, en ambientes naturales, que hay menos agregación y mayor cantidad de partículas minerales, éstas pueden variar considerablemente en tamaño y forma, y eso influye en las geometrías de trayectoria y en la altura y longitud que alcancen sobre la superficie del suelo (Li *et al.*, 2008a).

En estudios en túnel de viento, se encontró que el material era más grueso sobre un punto de inflexión que de acuerdo a la velocidad de viento se daría entre los 80 y 140 mm de altura (Tan *et al.*, 2014), o entre los 50 y 150 mm (Farrell *et al.*, 2012), disminuyendo a mayores alturas.

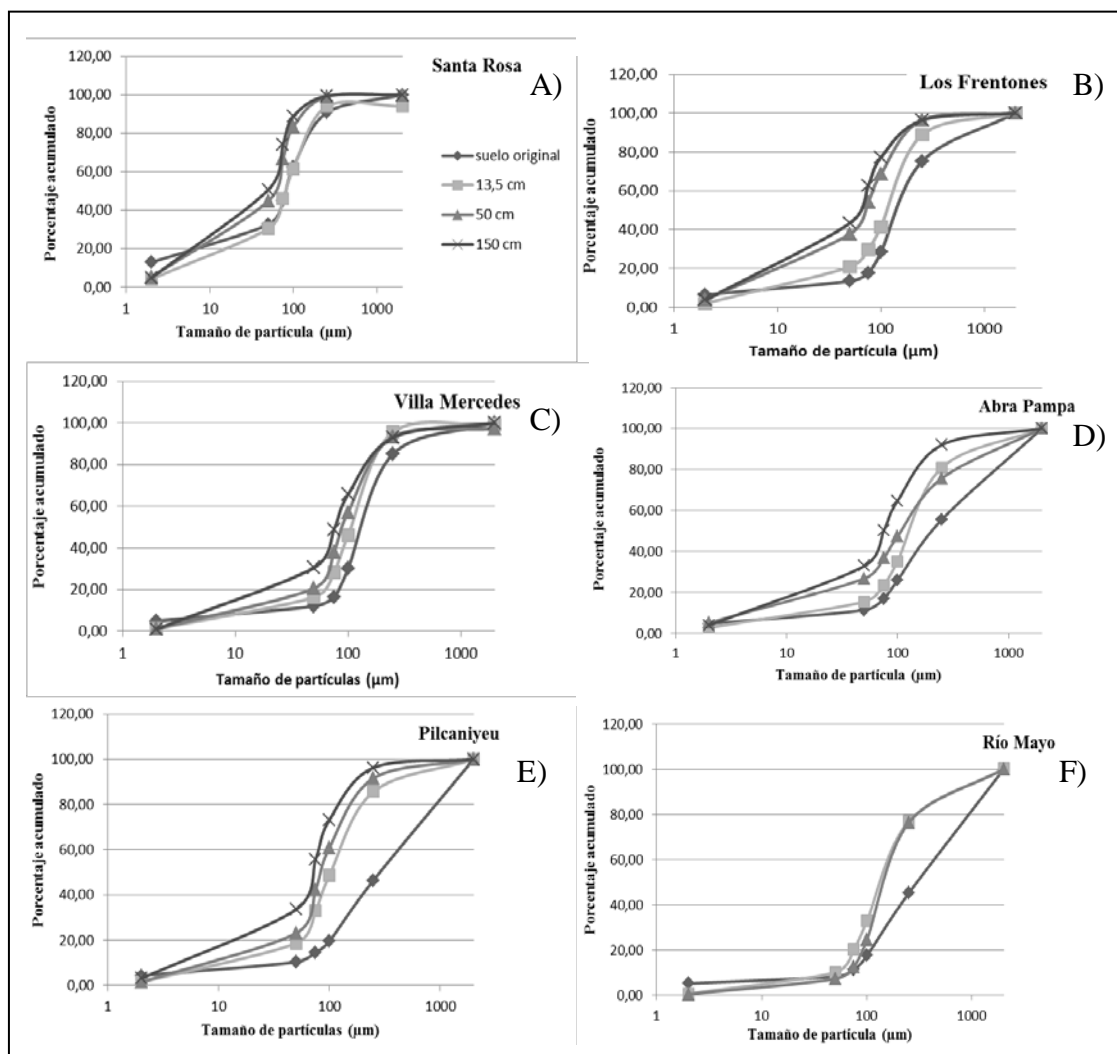


Figura 3.8. Curvas acumulativas de las fracciones texturales del suelo original y del material erosionado a los 13,5, 50 y 150 cm de altura, en los sitios A) Santa Rosa, B) Los Frentones, C) Villa Mercedes, D) Abra Pampa, E) Pilcaniyeu y F) Río Mayo.

De acuerdo al tamaño de partícula, existen diferentes perfiles, de forma que, para partículas de tamaño arenas gruesas se ajustaría a una función exponencial y para arenas finas menores de 160 µm a una función de Gauss. En un estudio efectuado en Los Países Bajos, encontraron una reversión en las tendencias del tamaño de grano a una altura aproximadamente 0,15-0,20 m sobre la cama en su sitio de playa (Arens *et al.*, 2002). Se han encontrado partículas más grandes que alcanzan elevaciones más altas que las más pequeñas a esas alturas, porque las partículas de distinto tamaño tendrían diferentes trayectorias que influyen en la elevación que pueden alcanzar (Dong y Qian, 2007). La

medición efectuada en este estudio a menor altura, correspondería a ese punto de inflexión y los resultados de Tan *et al.*, (2014) coincidirían principalmente con lo hallado en SR y en menor medida en VM y LF, ya que el material transportado a baja altura es semejante al del suelo original. Otro punto de coincidencia con esos autores es que por encima del punto de inflexión, la textura es más fina con la altura, pero presenta valores semejantes (curvas cercanas para SR, VM y LF entre el material colectado a los 50 y 150 cm de altura).

En los suelos Tc, aún a los 13,5 cm de altura, se observaron las mayores diferencias de textura, y que el material erosionado fue mucho más fino que el suelo original. Esto puede deberse a que las condiciones de cobertura, influyen en que sea menor el aporte desde la parcela de medición y que el material provenga de regiones aledañas. Dress *et al.* (1993) encontraron una correlación entre material de textura limo fino y distancia de la fuente de aporte. Es probable que en suelos Ls y Ar, el principal aporte de material esté dado desde la misma parcela, por lo tanto es semejante la textura del suelo original con la del material que se colecta a baja altura.

Se hallaron correlaciones lineales entre la proporción de diferentes fracciones granulométrica en el material erosionado y la VMaPE, que fueron positivas o negativas dependiendo del tamaño de material transportado (Tabla 3.4). No se halló ninguna relación con los otros parámetros climáticos (V_p , V_{mPE} y duración del evento erosivo), coincidiendo con los estudios de Wang *et al.* (2016) quienes tampoco hallaron ningún tipo de relación entre la variación de la velocidad del viento y las fracciones granulométricas. En tanto, al aumentar la VMaPE existió un incremento de partículas de hasta 100 μm de diámetro, y una disminución en las de diámetro mayor a 100 μm . No se halló ninguna relación entre la VMaPE y la fracción de 74 a 100 μm , tal vez por ser el tamaño de fracción a partir del cual existió un aumento o disminución de partículas con la velocidad. Al sumar las fracciones de 50 a 74 y de 74 a 100 μm de diámetro en tanto, se encontró una relación positiva, por lo que puede deducirse que cuando las velocidades aumentaron existió un mayor transporte de partículas de hasta 100 μm de diámetro. Es probable que a esas velocidades se hayan transportado agregados más grandes formados por MO y partículas finas, que les confiere baja densidad. Está comprobado que este tipo de agregados puede ser transportados más fácilmente que partículas minerales (Zobeck,

1991). Estos resultados son opuestos a los hallados por Qiang *et al.* (2007), quienes encontraron que el porcentaje de las fracciones gruesas, compuestas generalmente por partículas de arena mayor a 63 μm de diámetro, se incrementan con la fuerza del viento. En contraste la cantidad de partículas menores a dicho tamaño decrecen con el aumento de la velocidad del viento, siendo la fuerza del viento la que regula el tipo y cantidad de partículas que se movilizan. Ellos sugieren que con el incremento de la velocidad y las fluctuaciones del viento, las arenas son efectivamente transportadas. Ello no ocurriría, principalmente en las parcelas de Ls y Ar debido a que se ha mantenido el suelo sin rugosidad y los agregados menos densos son los más fácilmente transportados con mayores velocidades de viento.

No se encontraron relaciones con las arenas gruesas y muy gruesas, solamente se obtuvo una correlación significativa entre VMaPE y la fracción de 250 a 500 μm de los suelos Ls y Ar a los 50 cm de altura (Tabla 3.4). En los mismos suelos también se halló relación con la fracción de los limos gruesos (20 a 50 μm) a los 13,5 y 50 cm de altura. Probablemente la falta de correlación en los Tc se deba a la influencia que ejerce la cobertura natural en el perfil del viento, que provoca variaciones en la velocidad a distintas alturas.

Tabla 3.4. Ecuaciones y coeficientes de correlación lineal entre la proporción de diferentes fracciones granulométricas en el material erosionado y la velocidad máxima en período de excedencia.

Sitio	Altura muestreo cm	Fracción textural* %	a	b	N	R
TS	TA	0-20 μm	3,1661	0,3118	52	0,34 (p<0,05)
Ls Ar	13,5	20-50 μm	4,3109	0,236	12	0,57 (p<0,05)
Ls Ar	50,0	20-50 μm	12,093	0,3209	12	0,57 (p<0,05)
TS	TA	50-74 μm	6,117	0,3021	52	0,36 (p<0,01)
TS	TA	50-100 μm	19,787	0,3423	52	0,30 (p<0,05)
TS	TA	100-250 μm	58,081	-0,8295	52	0,41 (p<0,01)
TS	TA	100-500 μm	68,374	-0,9553	52	0,35 (p<0,01)
Ls Ar	50,0	250-500 μm	6,3639	-0,1424	12	0,73 (p<0,01)

* Fracción granulométrica vs velocidad máxima en período de excedencia (VMaPE), a y b coeficientes de regresión (cantidad de partículas = a + b VMaPE), N números de datos, r coeficiente de determinación de la regresión y significancia, TS todos los sitios, TA todas las alturas (13,5, 50 y 150 cm), Ls suelos loésicos, Ar suelo arenoso.

En la Figura 3.9 se observan las TE del material recolectado a distintas alturas respecto al suelo original. El material estuvo enriquecido principalmente en partículas de 2 a 75 μm para SR y de 2 a 100 μm para los restantes suelos. Los suelos Tc también tienen material enriquecido en partículas de 100 a 250 μm en las dos primeras alturas.

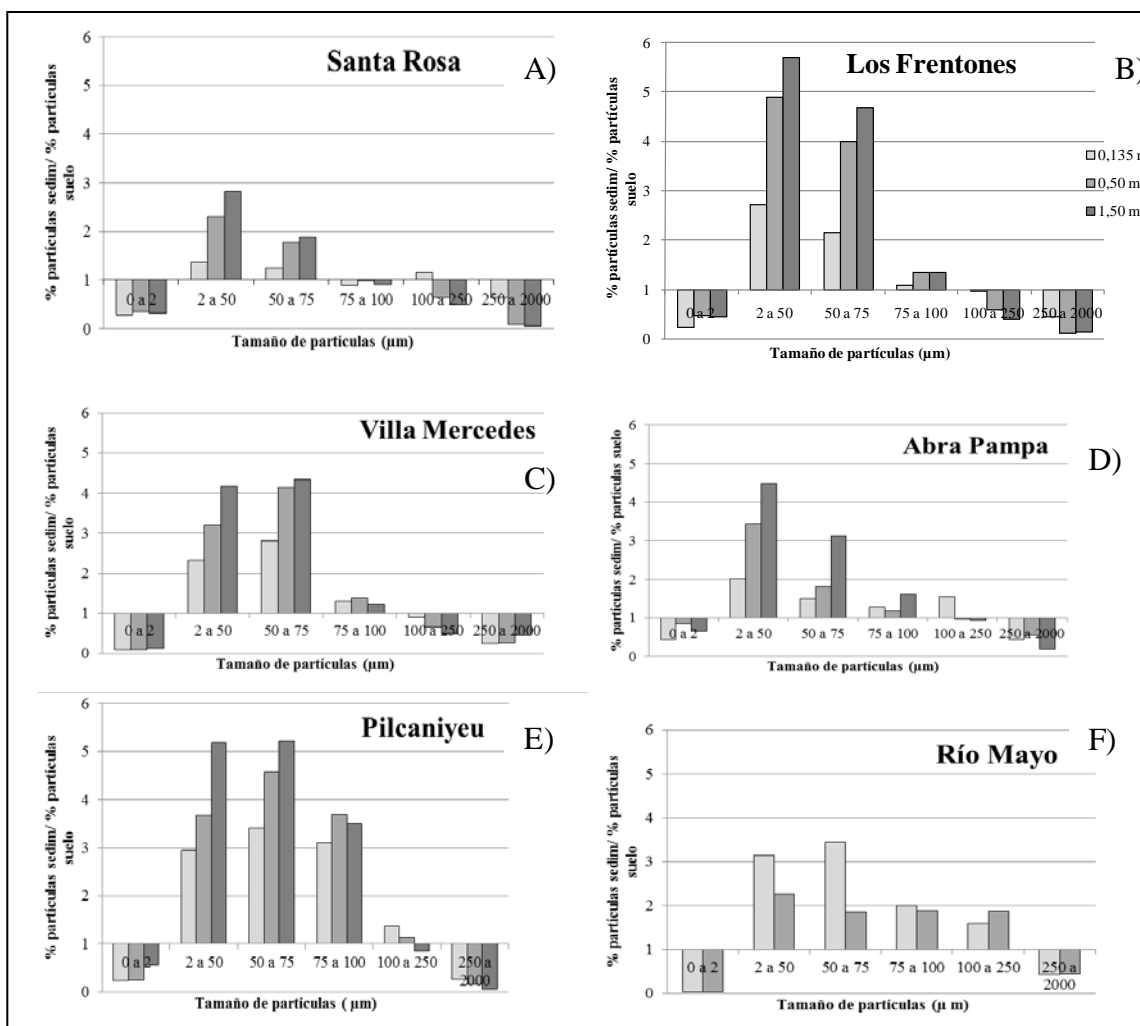


Figura 3.9. Tasas de enriquecimiento (porcentaje de partículas de una fracción granulométrica en el material colectado, respecto al porcentaje de la misma fracción en el suelo original) a los 13,5, 50 y 150 cm de altura, en los sitios A) Santa Rosa, B) Los Frentones, C) Villa Mercedes, D) Abra Pampa, E) Pilcaniyeu y F) Río Mayo.

Li *et al.*, (2009b) comprobaron también que las partículas transportadas por el viento correspondieron a tamaños menores a 125 μm de diámetro y luego de un período de 2 años de erosión continua, en el suelo original disminuyeron dichas partículas y aumentaron significativamente las de 250 a 500 μm de diámetro. Otros autores hallaron

como en este estudio, que el material erosionado siempre tuvo una granulometría más fina que el suelo original y que procesos continuos de EE puede causar pérdidas irreversibles de las partículas más finas (Lyles y Tatarko, 1986; Leys y McTainsh, 1996; Van Pelt and Zobeck, 2007; Li *et al.*, 2009b).

Las partículas mayores a 250 μm son grandes para ser transportadas a grandes distancias. Las de tamaño arcilla, generalmente se encuentran formando agregados que resisten mejor la abrasión que produce el viento, que aquellos agregados constituidos principalmente por limo (Chepil, 1957). Esto también corroborado para materiales sedimentarios eólicos (Füchtbauer y Müller, 1977). Estudios previos realizados en la RSPC (Argentina) y en Texas (EEUU) hallaron que la fracción transportada a distintas alturas estaba enriquecida en limos y arenas muy finas (Aimar, 2002; Zobeck y Fryrear, 1986a), y que cuando el proceso de degradación avanzó éstas fracciones decrecieron marcadamente al ser removidas del sitio, mientras que hubo un significativo incremento de arenas finas y medias Su *et al.* (2004).

A excepción de RM, en los restantes sitios, las TE fueron mayores a mayor altura. A 150 cm de altura las TE fueron generalmente del doble que las halladas a los 13,5 cm, es decir que el material que se transportó a mayor altura y que se desplazó a mayor distancia, fue el más enriquecido. Las TE fueron en LF>PC>AP>VM> RM>SR, es decir que los suelos de texturas más gruesas perdieron material más enriquecido que los más finos como SR, que está mejor estructurado. Esto concuerda con otros estudios que comprobaron que los procesos de EE produjeron mayores cambios en la granulometría en los suelos más arenosos (Lyles y Tatarko, 1986; Buschiazzo y Taylor, 1993; Aimar *et al.*, 2003).

Con estos resultados se estaría aceptando la hipótesis **H3**. *El material erosionado posee granulometrías más finas que los suelos originales*, ya que se comprobó que el material transportado estaba enriquecido en partículas finas, las tasas de enriquecimiento aumentaron con la altura, los volúmenes transportados de partículas finas aumentaron con la velocidad máxima de viento y en suelos menos evolucionados, el material estuvo más enriquecido respecto al suelo original que aquellos suelos mejor estructurados.

Distribución del material erosionado en el espacio

En la Figura 3.10 se observa el porcentaje de material sedimentado en el túnel de viento, en porcentaje y por tramos, desde la fuente de emisión hasta el final del mismo.

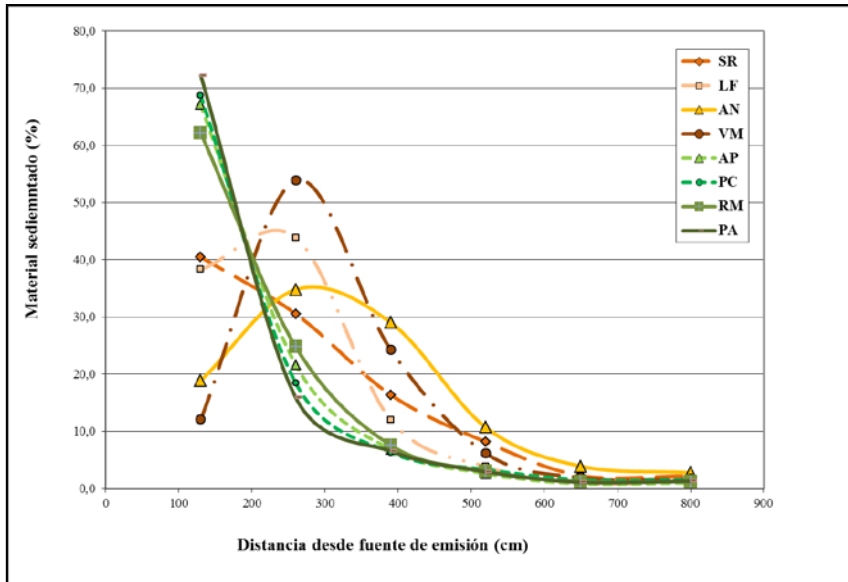


Figura 3.10. Proporción de material sedimentado en un túnel de viento en función de la distancia para suelos de Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

La utilización del túnel de viento para este ensayo permite el estudio del movimiento y distribución de agregados, en condiciones controladas, lo que posibilita obtener datos comparables entre suelos. Por otra parte, la sedimentación de partículas a lo largo del túnel, aunque a otra escala, se asemeja a la disposición que adquiere el material cuando es depositado por el viento generando geformas eólicas (Figura 3.11 A y B).

Los resultados indican que existieron 3 modelos de distribución del material a lo largo del túnel. Para SR las cantidades de sedimento fueron disminuyendo desde la fuente en forma progresiva, con un 40 % de material en el tramo inicial y un 2,2 % en el último tramo. Otro modelo de distribución corresponde a los suelos de AN, LF y VM, en los cuáles, en el tramo inicial, los valores fueron menores a los hallados para SR y con un máximo en el T2, que correspondieron al 35 % para AN, 54 % para VM y 44 % para LF. El tramo que siguió en abundancia de sedimento fue el T3 para los dos primeros suelos y

T1 para LF. Para el tercer modelo, suelos Tc, entre el 62 y el 72% se sedimentó en los primeros 130 cm, siendo brusco el descenso en los siguientes tramos hasta terminar casi asintóticamente. Los valores hallados en el primer tramo fueron de 62% para RM, 67% para AP, 69% para PC y 72% para PA.

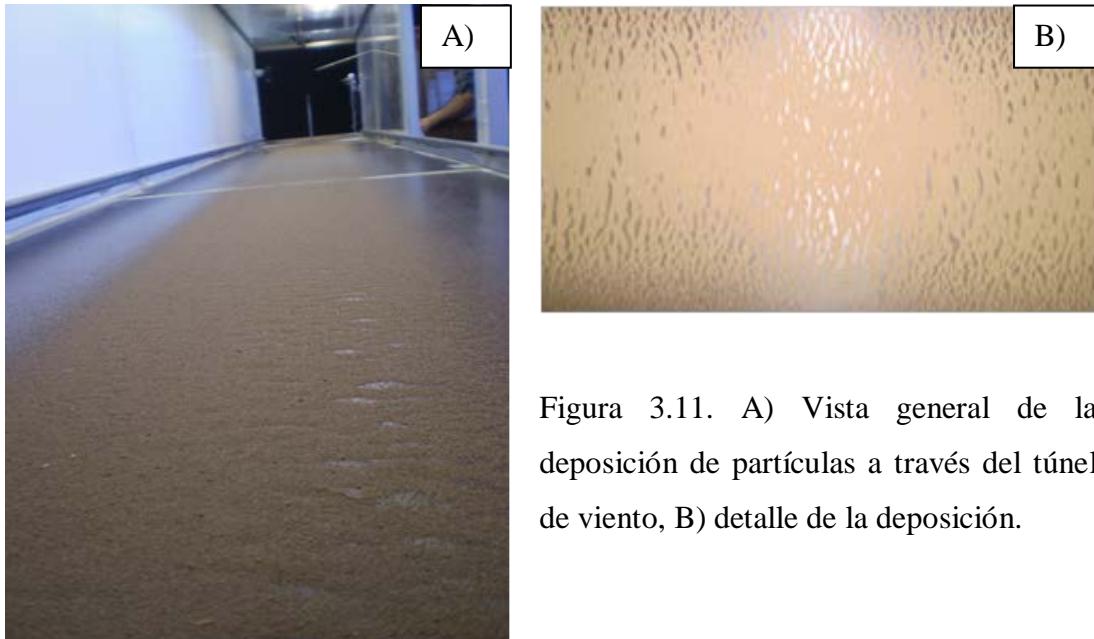


Figura 3.11. A) Vista general de la deposición de partículas a través del túnel de viento, B) detalle de la deposición.

Los diferentes patrones de sedimentación a través del túnel presentaron correspondencia con la composición granulométrica de los suelos (Figura 3.12). Para SR, la distribución de las partículas se asemejó a una distribución bimodal con la moda principal en las partículas de 100 a 250 μm de diámetro y la segunda moda, en el tamaño limo. Si bien este suelo tuvo dos modas, las distintas fracciones de partículas variaron entre 9 y 28 %, fue el suelo con mayor homogeneidad en cuanto a las cantidades de las distintas fracciones granulométricas. Por ello la sedimentación de las partículas fue disminuyendo paulatinamente hasta el final del túnel. Los otros suelos Ls (AN y LF), por ser de granulometría más gruesa que el de SR, tuvieron un comportamiento semejante al suelo Ar (VM). Para éstos tres suelos la moda se halló en las arenas de 100 a 250 μm de diámetro y tuvieron una distribución asimétrica positiva.

En los suelos desarrollados sobre sedimentos terciarios (RM, AP, PC y PA) la moda se encontró en el tamaño de arenas gruesas y muy gruesas (250 a 2000 μm), le

siguieron en cantidad, la fracción de 100 a 250 μm de diámetro. La suma entre las dos fracciones mencionadas anteriormente constituyó entre el 60 y 82 % del total de la muestra. El menor valor correspondió a PA que presentó el mayor contenido de arcilla, siendo para este suelo la fracción menor a 2 μm , la tercera en abundancia. La gran proporción de partículas de tamaño arena media y gruesa en el suelo original, generaron una mayor sedimentación en los primeros tramos del túnel. En el caso AN, VM y LF, el mayor volumen de partículas se depositó en el T2 probablemente porque en estos suelos predominaron arenas de tamaño fino, lo que habría permitido un mayor desplazamiento desde la fuente de emisión.

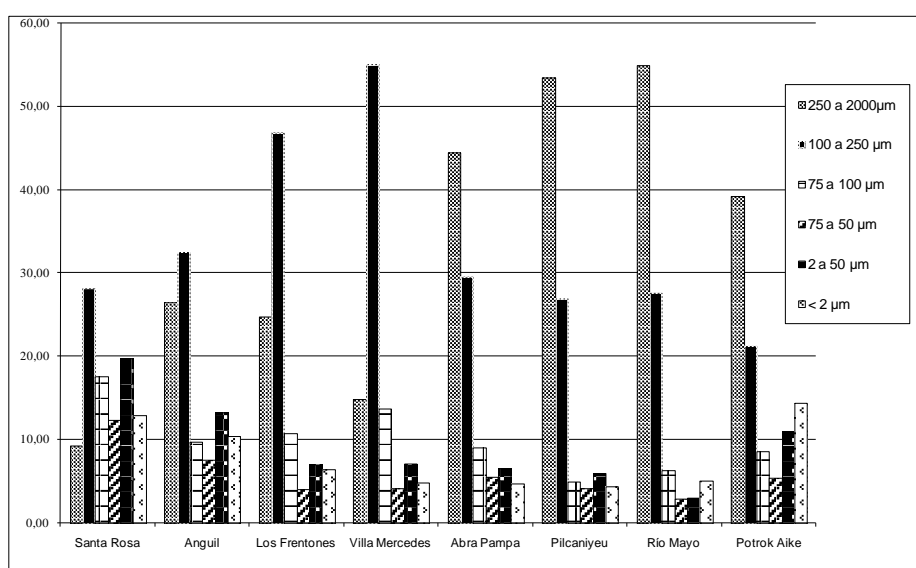


Figura 3.12. Análisis granulométrico de los suelos correspondientes a Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Además de la granulometría, otra propiedad del suelo que ha influenciado en éstos modelos de distribución, es su agregación. En la Figura 3.13 se observan para cada suelo las curvas acumulativas de los diferentes tamaños de partículas en el suelo original, luego de eliminarse los cementantes y dispersado la muestra, y del suelo agregado (sin proceder a la dispersión de la muestra). Para LF, AN y VM, ambas curvas se cruzan en un tamaño de partículas cercano a los 100 μm de diámetro. La fracción de agregados más abundante en estos suelos fue la de 100 a 250 μm de diámetro. Este tipo de material se desplazaría a

mayor distancia que los agregados más gruesos, de allí que la mayor concentración de partículas, para estos suelos se haya producido en el T2 del túnel.

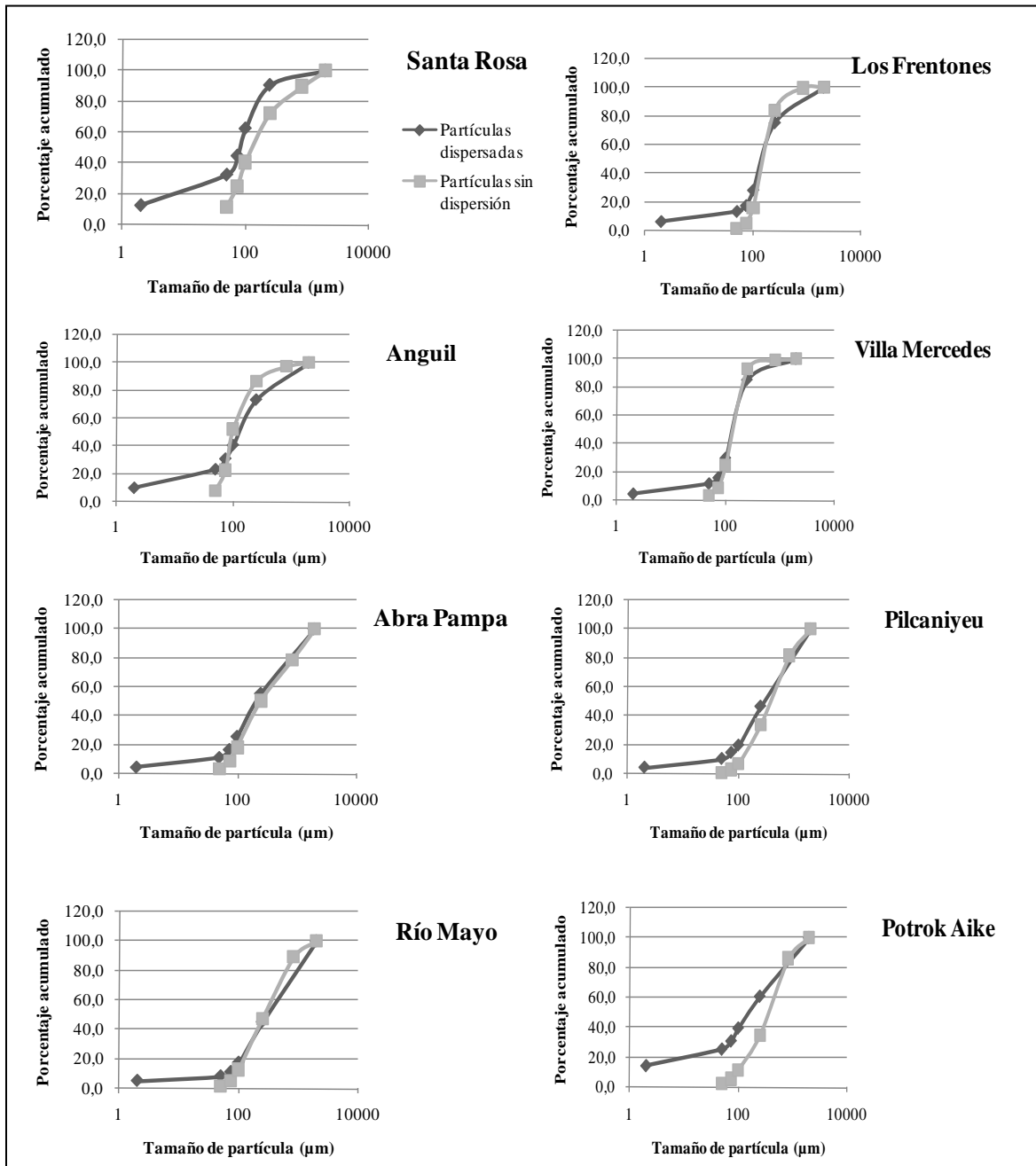


Figura 3.13. Curvas acumulativas de la distribución del tamaño de partículas determinadas con y sin dispersión, para los suelos de Santa Rosa, Los Frentones, Anguil, Villa Mercedes, Abra Pampa, Pilcaniyeu, Río Mayo y Potrok Aike.

El suelo de SR no presentó una intersección entre las dos curvas ni superposición en ningún punto. Dicha separación indicaría la presencia de agregados de diferentes tamaños por el aporte del carbono orgánico y contenido de arcillas que unen partículas individuales (Skidmore y Layton, 1992; Fryrear *et al.*, 1994). Chatenet *et al.* (1996) demostraron que los suelos texturalmente más finos tendían a poseer una mayor cantidad de agregados de menor tamaño que los suelos arenosos. Esto habría permitido que la sedimentación del material disminuyera paulatinamente hasta el final del túnel de viento.

En el caso de los suelos Tc, las curvas acumulativas de partículas y agregados tuvieron la misma forma y se hallaron casi superpuestas (AP) o ligeramente desplazadas (PC, RM) indicando mínimas diferencias entre el suelo dispersado y agregado, principalmente para éstos 3 sitios. Se ha comprobado que suelos con contenido de limo y arcilla inferior a 245 g kg^{-1} y bajos contenidos de MO, genéticamente no producen agregados que sean resistentes a ser erosionados (Colazo y Buschiazzi, 2010), aún en condiciones naturales (Tatarko, 2001). Sólo se observa un mayor desplazamiento en PA, es decir que de los suelos Tc es el único que tendría una mayor agregación producto de la mayor concentración de MO. La mayor cantidad de agregados de 250 a $840 \mu\text{m}$ de diámetro en los suelos Tc han provocado la mayor distribución de partículas en el T1.

En la Figura 3.14 (Anexo 4), se observa la granulometría del material sedimentado en cada tramo del túnel de viento, determinada sin dispersión de la muestra. En algunos tramos del túnel, la granulometría del material sedimentado fue la misma, para todos los suelos estudiados. Las partículas sedimentadas en los T2 y T3 tuvieron la moda en la fracción de 100 a $250 \mu\text{m}$, en todos los suelos. En el T4, el material sedimentado de SR, LF, AN, AP y RM tuvieron la moda en la fracción de 74 a $100 \mu\text{m}$ de diámetro. Para el material de VM, PA, PC la moda fue de 100 a $250 \mu\text{m}$. Sólo el suelo de AN presentó mayor proporción de partículas más finas (de 50 a $75 \mu\text{m}$).

En el T5 las fracciones más abundantes fueron las de 50 a $74 \mu\text{m}$ para los Ls y la de 74 a $100 \mu\text{m}$ para los Tc y Ar, resultando la otra en segundo lugar de abundancia. En el T6, en tanto, la moda del material sedimentado se halló en la fracción de 50 a $74 \mu\text{m}$ para todos los suelos. PA fue la excepción, ya que en éstos últimos dos tramos, tuvo las modas en

fracciones más gruesas. Así, para los T5 y T6 las fracciones más abundantes fueron de 100 a 250 μm y de 75 a 100 μm , respectivamente.

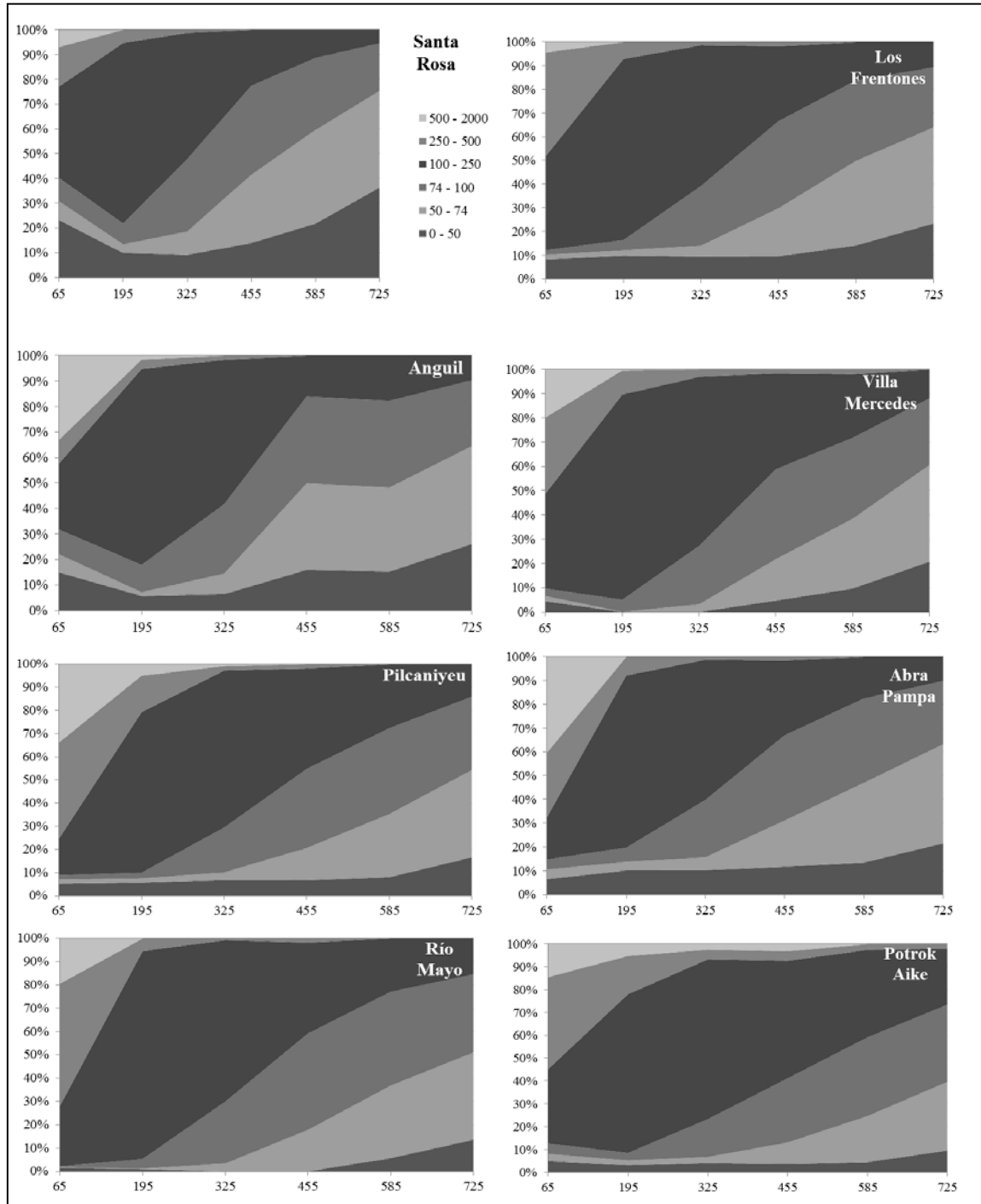


Figura 3.14. Proporción de fracciones texturales en muestras sin dispersar, sedimentadas a lo largo del túnel de viento, para los suelos de Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

De los suelos Tc, PA es el suelo con mayor contenido de arcilla (14,41 %) y mayor contenido de MO, por lo tanto si se comparan agregados de igual tamaño para distintos suelos, los de PA tendrían una menor densidad, con lo que podrían en este caso, aun siendo más grandes, transportarse a una mayor distancia.

La fracción menor a 50 μm de diámetro, fue más abundante en el último tramo del túnel para todos los suelos. En los Tc y LF hubo un aumento paulatino de la fracción hasta llegar al T6. En SR, VM y AN en tanto, la cantidad de partículas menores a 50 μm fue un poco mayor en el T1 que en los tramos intermedios. Las partículas de 50 a 250 μm de diámetro (Figura 3.14), gran parte de la fracción que se mueve por saltación, presentó en todos los suelos la máxima proporción en el T2 o T3, con valores de hasta el 90% del total de partículas. Sobre el final del túnel, SR fue el suelo con menor movimiento de estas partículas (64% del total), seguido por AN, VM y LF (76%) y los suelos Tc (84%).

Las arenas medias y gruesas (250 a 2000 μm) tuvieron igual comportamiento en todos los sitios aunque difirieron las proporciones. En todos los casos el mayor valor correspondió al T1, dado que por su mayor tamaño tienen menor desplazamiento, y en orden le siguieron el valor del T2 para finalizar casi asintóticamente sobre el final del túnel. Todos los suelos presentaron la misma tendencia pero, de acuerdo a los modelos de distribución espacial propuestos, en esta primera posición del túnel SR tuvo un 25 % de agregados de 250 a 2000 μm de diámetro, LF, VM y AN tuvieron porcentajes cercanos al 50% y para los Tc fue del 55 al 75% del total.

Se conoce que el material erosionado de suelos de la RSPC está enriquecido en limos (de 2 a 50 μm de diámetro) (Aimar, 2002), es por ello que es importante analizar su distribución espacial. En la Figura 3.15 se observa cómo varían los limos en los tres modelos hallados de distribución espacial de partículas. Se puede observar que presentan curvas semejantes pero desplazadas de acuerdo a los modelos propuestos. Los mayores valores encontrados y la curva con mayor pendiente correspondió a SR, los intermedios a AN, LF y VM y los más bajos para los Tc. Estudios efectuados en suelos agrícolas de la meseta de Columbia demostraron que las partículas menores a 32 μm de diámetro fueron transportadas por suspensión y los sedimentos de 33 a 45 μm por saltación y suspensión

(Sharratt, 2011), por lo que la mayor parte de los limos serán trasladados fuera del área de aporte y las pérdidas serían en $SR > LF, AN, VM > Tc$.

Estos modelos de distribución espacial indican que en los suelos Tc, que poseen una mayor proporción de partículas de mayor tamaño y baja agregación (a excepción de PA), la distribución del material sería más intensa cerca de la fuente de origen. Esto parecería contradecirse con el mayor movimiento de material a mayor altura en las mediciones de campo en PC, pero en ese caso generó tendencias inversas la cobertura con vegetación y gravas, que provocaron el desplazamiento de la capa límite. Es decir que en condiciones naturales, en los suelos Tc, habría una proporción mayor de movimiento de material a mayor altura, que con el suelo desnudo. En caso de que no existiera la cobertura, las partículas se desplazarían cerca del área de aporte, por sus condiciones genéticas de textura y baja agregación. La proporción de material que se transportaría en esa condición por suspensión, sería más baja que lo medido a campo en este ensayo.

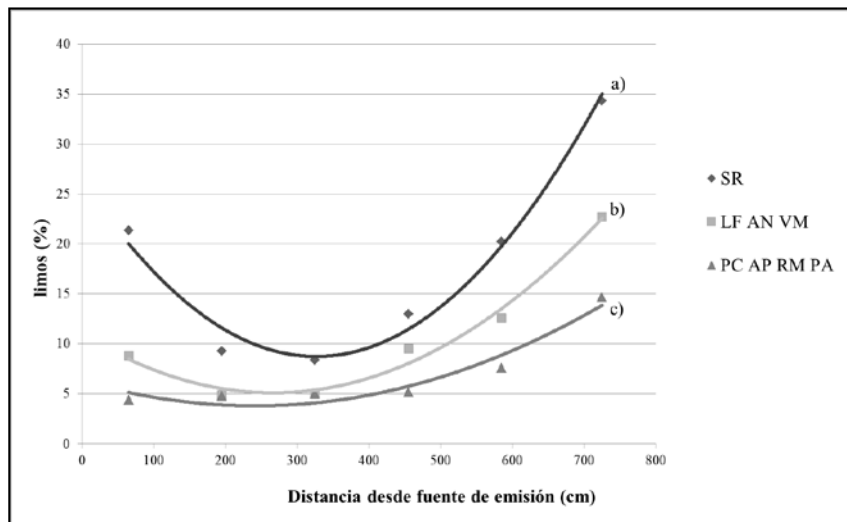


Figura 3.15. Contenido de limo en el material sedimentado a lo largo del túnel de viento, para los suelos de a) Santa Rosa (SR), b) Los Frentones (LF), Anguil (AN) y Villa Mercedes (VM) y c) Pilcaniyeu (PC), Abra Pampa (AP), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Con estos resultados se estaría validando parcialmente la **H4**. *El material erosionado desde suelos loésicos es transportado a mayor distancia que el material*

erosionado desde suelos terciarios o arenosos, ya que el suelo de SR se sedimentó a través de toda la superficie del suelo por la influencia que ejercieron las partículas de 50 a 250 μm de diámetro y la mayor agregación, que por rompimiento y por fricción con otras partículas en la sedimentación, se generan partículas más pequeñas que tienen mayor desplazamiento. No ocurrió lo mismo con los otros suelos Ls (LF y AN) que se comportaron como el Ar, sedimentándose más cerca de la fuente de emisión que el de SR. Los menos evolucionados tuvieron la mayor tasa de deposición en áreas cercanas a la fuente de emisión, debido a que los suelos Tc presentaron un mayor contenido de arenas medias y gruesas y baja agregación. Es decir que a una escala espacial más pequeña, las variaciones en la erodabilidad del suelo son controladas principalmente por el tamaño de partícula, su mineralogía y propiedades físicas como la densidad (Cornelis y Gabriels, 2003).

Emisión potencial de partículas finas (PM₁₀)

La Tabla 3.5 y la Figura 3.16 muestran, para cada suelo, el rango de humedad dentro del cual la emisión de PM₁₀ decreció linealmente con el incremento en la humedad del suelo ($p < 0,01$). Por debajo de este rango la emisión fue máxima y por encima de este rango la emisión fue despreciable.

Tabla 3.5. Ecuaciones y coeficientes de la relación lineal entre la emisión de PM₁₀ y la humedad del suelo.

Sitio	Rango de Humedad* %	a	b	N	R ²
Villa Mercedes	0,7-3	3230,3	-1023,7	4	0,9957
Abra Pampa	0,35-2	3052,7	-1560,1	5	0,9504
Rio Mayo	1,5-3,2	1981,7	-631,55	4	0,8855
Santa Rosa	0-6	4646,7	-866,34	10	0,936
Pilcaniyeu	1,5-3	2315,6	-784,7	4	0,9509
Potrok Aike	3,7-8,3	3285,5	-410,68	6	0,9625
Anguil	0-3,6	5840,5	-1539,2	8	0,9336

* Rango de Humedad dentro de la relación lineal emisión de PM₁₀ vs humedad del suelo, a y b coeficientes de regresión (emisión de PM₁₀ = a + b humedad), N números de datos, r² coeficiente de determinación de la regresión.

La amplitud del rango de humedad difirió entre suelos, decreciendo en la siguiente secuencia: SR > PA > AN > VM > RM > AP > PC. La amplitud del rango de humedad se relacionó directamente con el contenido de limo + arcilla del suelo ($R^2 = 0,92$, $p < 0,05$). La suma de las fracciones finas (limo + arcilla) fue relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua en suelos poco desarrollados de la RSPC (Quiroga y Buschiazzo, 1988). Esto estaría indicando que la amplitud del rango de humedad donde la emisión de PM_{10} cae linealmente con la humedad del suelo podría estar relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua. El primer grupo de suelos, los Ls, no mostraron limitaciones para la emisión de PM_{10} con el aumento de la sequedad. Probablemente, el secado de estos suelos de textura más fina y poros más finos sea en forma progresiva. En tanto los suelos que se desarrollaron sobre sedimentos arenosos y, al parecer, contienen una limitada cantidad de PM_{10} , tendrían un secado más rápido.

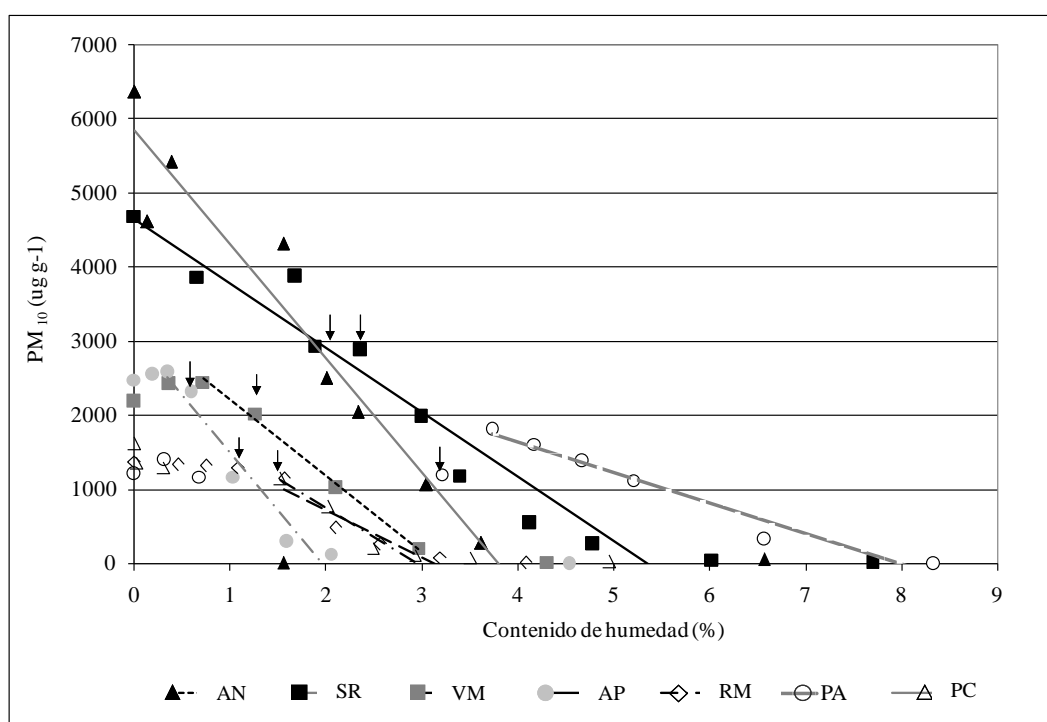


Figura 3.16. Relación entre la emisión de PM_{10} y la humedad del suelo para los suelos de Santa Rosa (SR), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA). (La flecha indica la emisión de PM_{10} para el suelo seco al aire).

Esto se debería a la presencia de poros gruesos que permiten liberar la baja cantidad de partículas finas, con contenidos relativamente altos de humedad. Suelos con alta

capacidad de almacenamiento y agregación necesitan más agua para dejar de emitir debido a que en estos suelos el agua llena primero el interior de los agregados y luego pega las partículas de polvo a las más grandes (Funk *et al.*, 2008).

En SR y AN la emisión de PM_{10} decreció con el aumento en la humedad del suelo en forma lineal a lo largo de todo el rango de humedad estudiado, mientras que en el resto de los suelos la emisión de PM_{10} comenzó a disminuir después de un determinado contenido de humedad en el suelo. La pendiente de la recta de regresión entre la emisión de PM_{10} y la humedad del suelo fue representada por el coeficiente b presente en la Tabla 3.5. El coeficiente b muestra la caída en la emisión de PM_{10} cuando la humedad del suelo aumenta 1 %. Valores más grandes del coeficiente b indican pendientes más pronunciadas y además un mayor efecto de la humedad sobre la emisión de PM_{10} . Estudios anteriores encontraron que las emisiones de PM_{10} estaban relacionadas negativamente con la humedad del suelo de forma no lineal (Madden *et al.*, 2010; Clausnitzer y Singer, 2000). Esta diferencia con los resultados de este estudio puede ser debido a que Madden *et al.* (2010) analizaron suelos de diferente clase textural en forma conjunta y Clausnitzer y Singer (2000) utilizaron sólo un suelo franco-arcilloso y no consideraron humedades en el suelo inferior al 15%. Estos autores relacionaron la emisión de PM_{10} con una ecuación única de ajuste para todo el rango de humedad. En este trabajo sólo se analizó el rango lineal, donde las emisiones de PM_{10} cambiaron sustancialmente con la humedad del suelo. La consideración de la porción lineal de las relaciones para ajustar la emisión y la humedad del suelo permitió una mejor descripción de la dinámica del proceso, como se muestra por valores de R^2 por encima de 0,9 en todos los casos.

La Figura 3.16 muestra que los suelos con las emisiones de PM_{10} superiores tenían también un alto contenido de humedad umbral (CHU). Este fue el caso de AN y SR, que emitían PM_{10} en el contenido de agua del suelo de hasta el 3,8% y 5%, respectivamente. Los otros suelos (excepto PA que tiene baja emisión de PM_{10} y alta CHU) mostraron bajas emisiones de PM_{10} y bajos CHU (entre 0,5% y 3,3%). Tales resultados pueden explicarse sobre la base de las texturas de cada uno de los suelos analizados. Los suelos arenosos (VM, AP, PC y RM) necesitan menos agua para detener la emisión de PM_{10} que los de textura más fina (SR y AN) o más agregados (PA) (Funk *et al.*, 2008).

Los suelos con alta emisión de PM_{10} presentaron alta humedad umbral de emisión (Figura 3.16), siendo ésta la mínima humedad a la cual el suelo deja de emitir PM_{10} . En el caso de los Ls (SR y AN) que tuvieron altas emisiones de PM_{10} , la humedad umbral fue de 3,8 % y 5 % respectivamente. En el resto de los suelos, excepto PA, la emisión de PM_{10} fue menor, al igual que la humedad umbral, la cual varió entre 0,5 y 3,3%. En el caso de PA, el CHU fue mayor que en los otros suelos (8%). Este comportamiento no era de esperar en un suelo que tiene contenidos de limo más altos, y por lo tanto alto contenido de materia particulada. La explicación a esto puede estar relacionada con los altos contenidos relativos de MO (Tabla 2.1) que favorece la agregación del suelo, y limita la emisión de partículas finas. La separación entre las curvas acumulativas de la distribución del tamaño de partículas determinadas con y sin dispersión del suelo original de PA, confirma que éste presenta una mejor agregación (Figura 3.13). El efecto positivo de la MO sobre la agregación de los suelos de texturas gruesas ha sido ampliamente demostrado en estudios previos (Quiroga y Buschiazzo, 1988; Méndez *et al.*, 2006; Hevia *et al.*, 2007). Suelos con mayor agregación necesitarían mayores requerimientos de humedad para frenar la emisión de PM_{10} . Esto se debería a que necesitan más agua para llenar los poros internos de los agregados. Una vez que estos poros internos están llenos, el agua comienza a pegar las partículas de polvo a las partículas más grandes. La reducción en la emisión de polvo comienza cuando el agua pega las partículas finas de polvo a las partículas de mayor tamaño (Funk *et al.*, 2008). La humectación del suelo PA en una primera etapa es el llenado de los agregados intercomunicados finos. Esto ocurrió con contenidos de humedad del suelo que van desde 0% a 3,5%. Justo por encima de un contenido de humedad de 3,5%, el agua comienza a unir las PM_{10} a las partículas gruesas. Esto reduce la emisión de PM_{10} y explica porque en PA existe una baja emisión de PM_{10} con contenidos de humedad mayores a 3,5%.

El coeficiente b de la regresión lineal entre las emisiones de PM_{10} y la humedad del suelo (Figura 3.16 y la Tabla 3.5) representa la tasa de cambio de las emisiones de PM_{10} con aumentos de humedad del suelo. Valores más grandes de b indican mayores efectos de la humedad del suelo en la emisión de PM_{10} . Un aumento del 1% en el contenido de humedad del suelo dentro del rango lineal de emisión de PM_{10} puede producir una reducción de la emisión de PM_{10} de $1500 \mu\text{g g}^{-1}$ en AP y AN, $1000 \mu\text{g g}^{-1}$ en VM, 870

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en SR, $785 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en PC, $630 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en RM y $410 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ en PA. Tales resultados indican que la humedad del suelo afecta la tasa de emisiones de partículas en suelos Ls, menos en los suelos arenosos desarrollados sobre sedimentos Tc y muy poco en el suelo bien estructurado y con mayor contenido de MO de PA.

El coeficiente b de la relación lineal entre la emisión de PM_{10} y el contenido de humedad del suelo presentó una buena correlación con la relación limo/MO (Figura 3.17). Ninguna de las fracciones texturales por si solas, ni la MO, pudo explicar el efecto de la humedad sobre la emisión de PM_{10} . Esta relación indica que altos contenidos de limos o bajas concentraciones de MO produce un gran efecto sobre la humedad del suelo e influye sobre las tasas de emisión de PM_{10} .

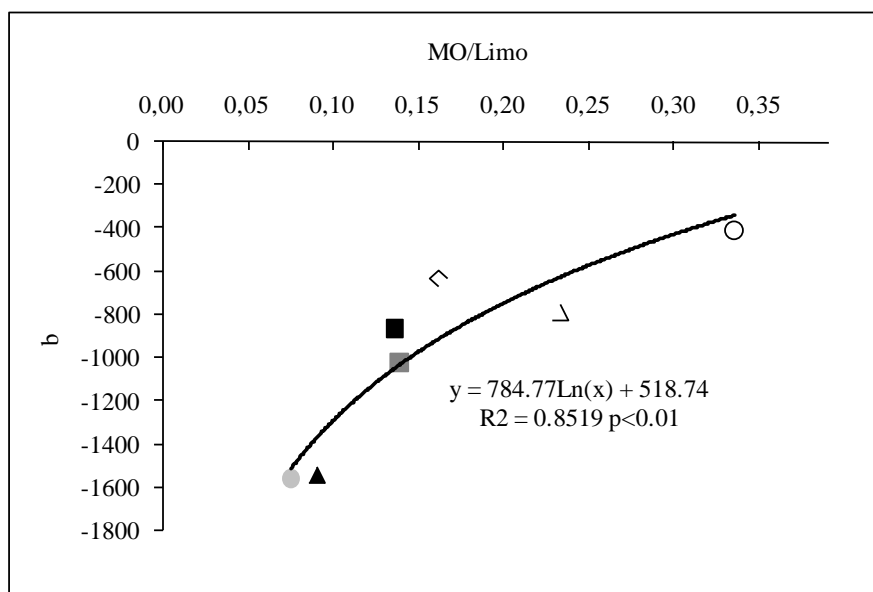


Figura 3.17. Relación entre el coeficiente b de la regresión entre la emisión de PM_{10} y la humedad del suelo, y el cociente MO/limo.

Por ejemplo, la emisión de PM_{10} desde suelos con altos contenidos de partículas finas podrían ser más afectados por cambios en los contenidos de humedad, a menos que presenten también un alto contenido de MO. Esto se explica ya que los limos se relacionan con las PM_{10} (U.S. EPA, 1995; Carvacho *et al.*, 2004) y existe además una relación entre MO y la porosidad, sobre todo en suelos de texturas gruesas (Quiroga y Buschiazzi, 1988). La descomposición de la MO favorece la formación de macroagregados, mientras que los

polisacáridos e hifas fúngicas favorece la microagregación (Six *et al.*, 2000; Beare *et al.*, 1997). Una disminución en el suelo de la MO invariablemente conduciría a una disminución en la porosidad del suelo y a un aumento de la densidad aparente (Tisdall y Oades, 1982).

Las emisiones máximas de PM_{10} no ocurrieron en muestras secas al aire, sino en muestras secas a $60^{\circ}C$ o a temperaturas superiores, en todos los casos. Estas emisiones se ordenaron en la siguiente secuencia $RM (1377 \mu g g^{-1}) < PA (1404 \mu g g^{-1}) < PC (1618 \mu g g^{-1}) < VM (2450 \mu g g^{-1}) < AP (2584 \mu g g^{-1}) < SR (4691 \mu g g^{-1}) < AN (6500 \mu g g^{-1})$. Por lo tanto, las emisiones máximas de PM_{10} fueron mayores en suelos Ls (SR y AN), que en Ar y Tc (VM, AP, PC y RM) o arenoso pero estructurado (PA). En general, las emisiones máximas de PM_{10} tendieron a ser mayores en suelos con más altos contenidos de limo (Figura 3.16 y Tabla 2.1). Estos resultados acuerdan parcialmente con estudios anteriores que consideraban que las posibles emisiones de PM_{10} dependían de los contenidos de limo (US EPA, 1995; Carvacho *et al.*, 2004). Esto no coincidiría con lo ocurrido en AP y PA. La tendencia encontrada en AP, mostró una alta emisión de PM_{10} ($2584 \mu g g^{-1}$) con un bajo contenido de limos (6,6%), y en el PA se produjo una emisión baja ($1.404 \mu g g^{-1}$) con contenidos de limo altos (11%). Tales tendencias pueden explicarse sobre la base de los contenidos MO de ambos suelos, ya que eran bajos en AP (0,5%) y altos en PA (3,7%). Es conocido que la MO regula la velocidad de agregación de los suelos arenosos (Méndez *et al.*, 2006; Hevia *et al.*, 2007). Una vez más, en la Figura 3.13 se observan las curvas acumulativas de la distribución del tamaño de partículas determinadas con y sin dispersión, casi superpuestas para AP, y separados para PA, lo que demuestra mayor agregación en el último suelo.

La Figura 3.18 muestra la relación entre la máxima emisión de cada suelo, la cual es independiente del contenido de humedad del suelo, y el cociente entre el contenido de limo y MO del suelo. Al contenido de MO se le sumó un valor de 1 a fin de obtener mediciones de PM_{10} cuando el valor de MO fuera cero. Esta relación indicaría que el limo presente en el suelo favorece la emisión de PM_{10} mientras que la MO la reduce. La MO reduce la emisión de PM_{10} dado que esta favorece la agregación de las partículas que no poseen carga como los limos. Las partículas finas de limos menores a $10 \mu m$ de diámetro,

pueden agregarse solamente cuando en el suelo están presentes agentes cementantes como por ejemplo la MO (Alfaro *et al.*, 2008). Al respecto Méndez *et al.* (2006) encontraron que en suelos de la región semiárida Argentina aumenta la proporción de la fracción de agregados de 2 a 50 μm con el aumento en el contenido de MO en el suelo.

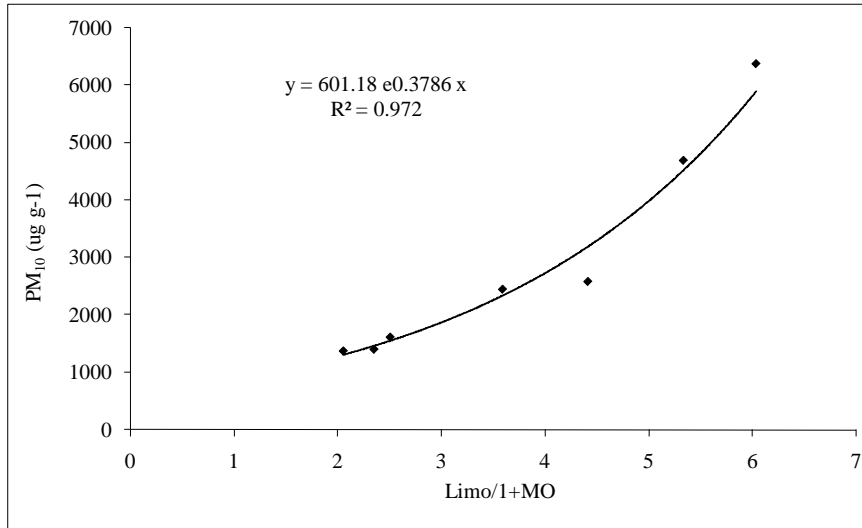


Figura 3.18. Relación entre la máxima emisión de PM₁₀ y el cociente entre el limo y 1+MO, para los suelos estudiados.

Las emisiones máximas de PM₁₀ en suelos arenosos y arenosos francos dependerían de los contenidos de limo y MO y está parcialmente de acuerdo con lo hallado por Madden *et al.* (2010). Esos autores encontraron que las emisiones de PM₁₀, medida a bajo contenido de humedad, dependían de la relación de limo y arcilla. Sin embargo, ellos analizaron suelos texturalmente más finos. De acuerdo a los resultados obtenidos, en los suelos arenosos el contenido de MO regularía las tasas de emisión de la misma forma que la arcilla, en los suelos de textura fina.

Se encontró además una relación positiva entre las emisiones de PM₁₀ de muestras secadas a 105°C y la emisión de PM₁₀ de las muestras secadas al aire ($p < 0,001$). No era de esperar dicha correlación, debido a que el secado a 105°C podría aglutinar partículas de arcilla que provocaría una disminución de la cantidad de partículas finas que podrían ser emitidas. Según Hepper *et al.* (2008), este efecto es más intenso en suelos de texturas finas que en los de textura gruesa. Como consecuencia de estos resultados se puede deducir que

el secado a 105°C no afectó a la cantidad de partículas finas que pueden ser emitidas. Esto puede ser debido al hecho de que, en suelos de la RSPC se comprobó que la aglutinación de arcillas se produce por encima de 300 ° C (Hepper *et al.*, 2008). La existencia de una función lineal y una buena correlación entre las emisiones de PM₁₀ de muestras que se secaron a 105 ° C y muestras secadas al aire, permitiría el uso de muestras secadas a 105 °C como un método estándar, con el fin de predecir las emisiones de PM₁₀ en suelos con distintas capacidades de retención de agua.

Las emisiones de PM₁₀ de suelos secados al aire y humedecidos, fueron explicadas por los contenidos de humedad del suelo y de arcilla. De acuerdo a Ec. [7] las emisiones de PM₁₀ en suelos arenosos y arenosos francos, disminuye con el aumento de la humedad del suelo y con la disminución en el contenido de arcillas.

$$\log PM_{10} = 1067 - 547.7 HS + 194.9 Arc \quad \text{Ec. [7]}$$

donde log PM₁₀ es el logaritmo de la emisión de PM₁₀ (µg g⁻¹), SM humedad del suelo (%) y C contenido de arcilla del suelo (%), n= 39 R²= 0.86 .

Estos resultados concuerdan parcialmente con los hallados por Funk *et al.* (2008), quienes determinaron que las emisiones de PM₁₀ de suelos arenosos dependen de la humedad del suelo y de los contenidos de limo y MO. Esta diferencia se debe probablemente al hecho de que Funk *et al.* (2008) consideraron diferentes temperaturas de secado mientras que en el presente estudio sólo se tuvieron en cuenta las muestras secadas al aire. La incorporación de MO y limo en la ecuación [7] logró un aumento insignificante en el coeficiente de determinación, razón por la cual no fue considerado. Este comportamiento es debido probablemente a que el efecto de la humedad en la emisión de PM₁₀ es dependiente de la relación MO /limo (Figura 3.17), por lo tanto, la humedad del suelo regula los efectos de la MO y de los limo sobre las emisiones de PM₁₀.

Con estos resultados se estaría validando la **H1**. *Los suelos desarrollados sobre materiales loésicos, al presentar mayor contenido de limo y arcilla, tienen mayor*

potencial de emisión de partículas finas (PM₁₀) que aquellos desarrollados sobre arenas eólicas y sedimentos terciarios.

MINERALOGIA DE LOS SUELOS Y DEL MATERIAL EROSIONADO

Estado de agregación y mineralogía de la fracción de 50 a 74 μm

En la fracción de 50 a 74 μm de diámetro de AP se observó que la mayor parte de la muestra estuvo constituida por líticos volcánicos (Figura 3.19 A y B). Además se encontró cuarzo monocristalino, plagioclasas con maclas polisintéticas, micas (Figura 3.19 C), hipersteno y hornblenda basáltica.

En el suelo de PC, predominaron los líticos volcánicos alterados que fueron los más abundante (Figura 3.19 D y E) y en segundo lugar cuarzo. Se encontró además vidrio volcánico fluidal alterado (Figura 3.19 F) y en escasa concentración hornblenda basáltica, clinopiroxeno y plagioclasa con macla polisintética.

En RM predominaron las partículas minerales, no se observaron agregados (Figura 3.20 A). Lo más abundantes son los líticos volcánicos (Figura 3.20 B y C). Además se encontró vidrio volcánico fluidal alterado y vidrio volcánico común, cuarzo monocristalino, ortosa y augita (piroxeno).

En general en los suelos Tc, predominaron partículas individuales de minerales. En PA, en tanto, se observó una importante cantidad de agregados formados por la unión de minerales y materia orgánica (Figura 3.20 D y E). El mineral más abundante fue el cuarzo (Figura 3.20 F), seguido por plagioclasa de macla polisintética. A diferencia de los restantes suelos Tc, hubo muy escasa cantidad de líticos y algunos de ellos fueron metamórficos. Se halló también ortosa y plagioclasa de macla Carsbald.

En el suelo Ar de VM se encontró gran cantidad de líticos volcánicos (Figura 3.21 A), seguido en número por cuarzo. Presencia también de plagioclasa con macla polisintética, hornblenda común (Figura 3.21 B), vidrio volcánico fluidal (Figura 3.21 C), microclino y en forma escasa ortosa. Se halló un importante número de partículas con pátinas de óxido de Fe.

De los suelos Ls, en LF, predominaron cuarzos monocristalinos con pátina arcillosa y líticos volcánicos (Figura 3.21 D). Se halló también un importante número de partículas de cuarzo con pátinas de Fe. Se halló además plagioclasa maclada polisintética, opacos y microclino (Figura 3.21 E y F). La presencia de éste último mineral en la muestra indicaría que habría una importante cantidad del mismo en el material originario, dado que el microclino es un mineral que se degrada fácilmente.

En el suelo de SR la cantidad de agregados superaron el contenido de partículas minerales individuales, debido a la presencia de materia orgánica (Figura 3.22 A y B). Los minerales más abundantes fueron líticos volcánicos, algunos de ellos alterados, vidrio volcánico y cuarzo, (Figura 3.22 C). Hay escasos piroxenos y hornblenda común. En AN en tanto, la mayoría de los minerales fueron vidrios volcánicos con textura fluidal alterada. Se hallaron muy escasos minerales de cuarzo. Si bien se encontraron agregados, los mismos no fueron tan abundantes como en el suelo de SR (Figura 3.22 D). Se hallaron además hipersteno (Figura 3.22 E), hornblenda basáltica (Figura 3.22 F), líticos volcánicos alterados, plagioclasa zonada y zircón.

Los minerales hallados en los Ls coincidiría con lo reportado por Morrás (1995) para limos finos, quién halló que los sedimentos loéssicos de la región chaqueña contienen más cuarzo y menos feldespato y vidrio volcánico que en los de la Región Pampeana. Si bien la fracción analizada es de mayor tamaño, en SR y AN se halló importante presencia de vidrio volcánico, influencia del material volcánico aportado desde la cordillera de los Andes (Kröhling, 1999) y en LF de cuarzo. La mineralogía de los Ls coincidiría con lo reportado para material transportado por flujo vertical y depositado localmente, donde predominaron los minerales de cuarzo llegando a un 50% del total de la masa mineral (Lawrence y Neff, 2009). Si bien estudios previos mostraron que los minerales silicatados

como cuarzo, feldespato y filosilicatos son dominantes en el material transportado por el viento (Schütz y Sebert, 1987), salvo para LF y en parte en SR, en los restantes sitios predominaron los líticos volcánicos.

De lo anteriormente expuesto, SR presentó una mayor cantidad de agregados en la fracción de 50 a 74 μm de diámetro. Ello estaría validando las conclusiones alcanzadas en el apartado *Distribución del material erosionado en el espacio*, en relación a la mayor distribución de este suelo a lo largo del túnel de viento en comparación con los restantes. También la presencia de mayor agregación validaría las TE en partículas más finas, halladas en SR.

En PA también se observó presencia de agregados, lo que explicaría el mayor volumen de partículas de mayor tamaño sobre los dos tramos finales del túnel de viento, en relación a los restantes suelos Tc.

Morfología del material particulado (PM_{10})

En las Figuras 3.23, 3.24 y 3.25 se observa una vista general y un detalle de la morfología del material particulado. A excepción de PA, en los restantes suelos Tc (AP, PC y RM), se halló que la fracción menor a los 10 μm de diámetro está formada principalmente por partículas minerales (Figura 3.23 B, D y F, respectivamente).

También en el suelo Ar de VM, las PM_{10} estuvieron formadas principalmente por partículas minerales individuales (Figura 3.24 F). Se había concluido que estos suelos poseían una capacidad intermedia de emitir partículas finas, y la morfología lo confirma.

En PA, en tanto se puede observar en los detalles (Figura 3.24 B, C y D) que el material particulado está formado en mayor medida por agregados constituidos por partículas de menor tamaño y material orgánico.

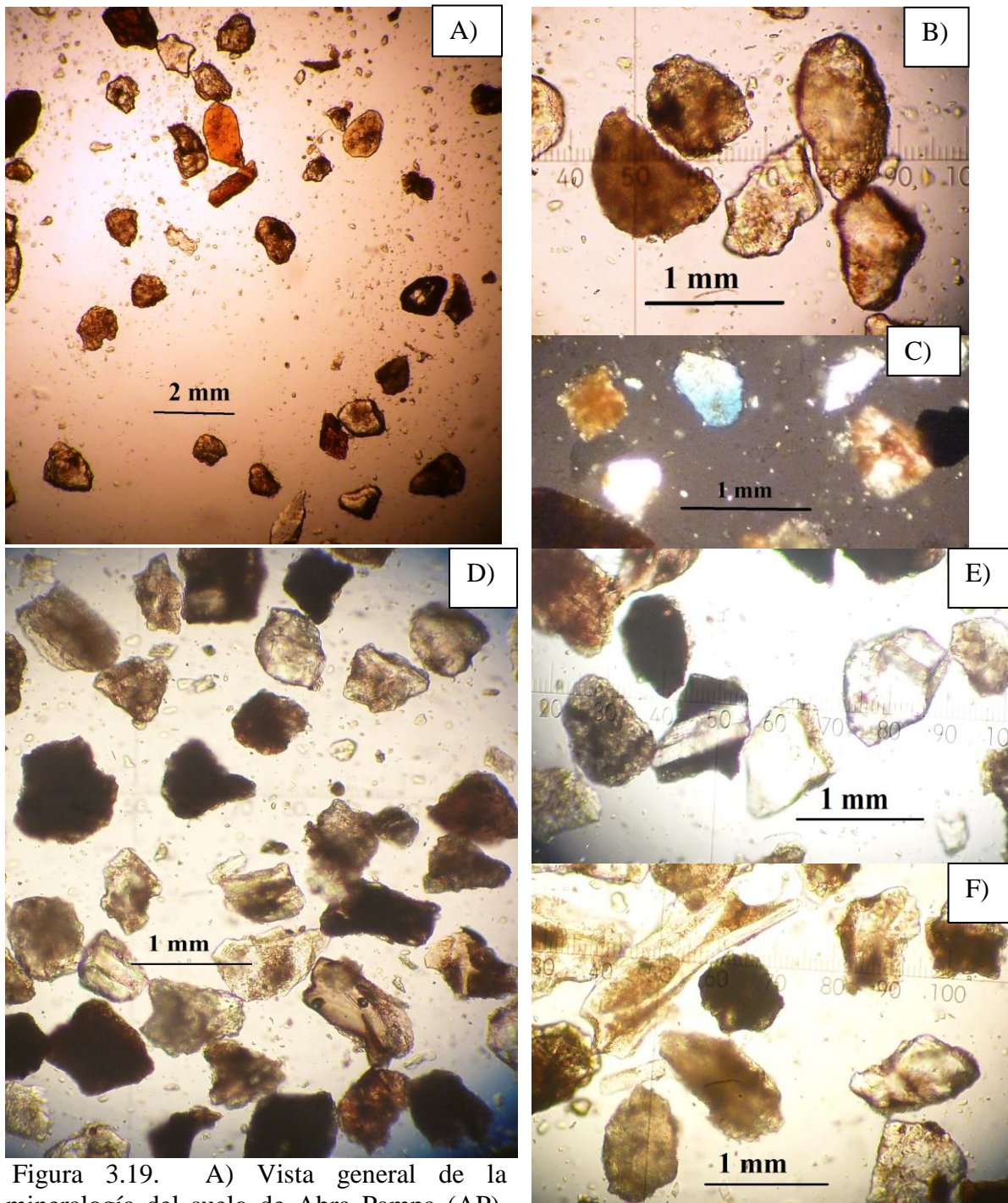


Figura 3.19. A) Vista general de la mineralogía del suelo de Abra Pampa (AP), B) líticos volcánicos (AP) y C) Mica azul (AP), D) vista general del suelo de Pilcaniyeu (PC), E) líticos volcánicos (PC) y F) vidrio fluidal alterado (PC).

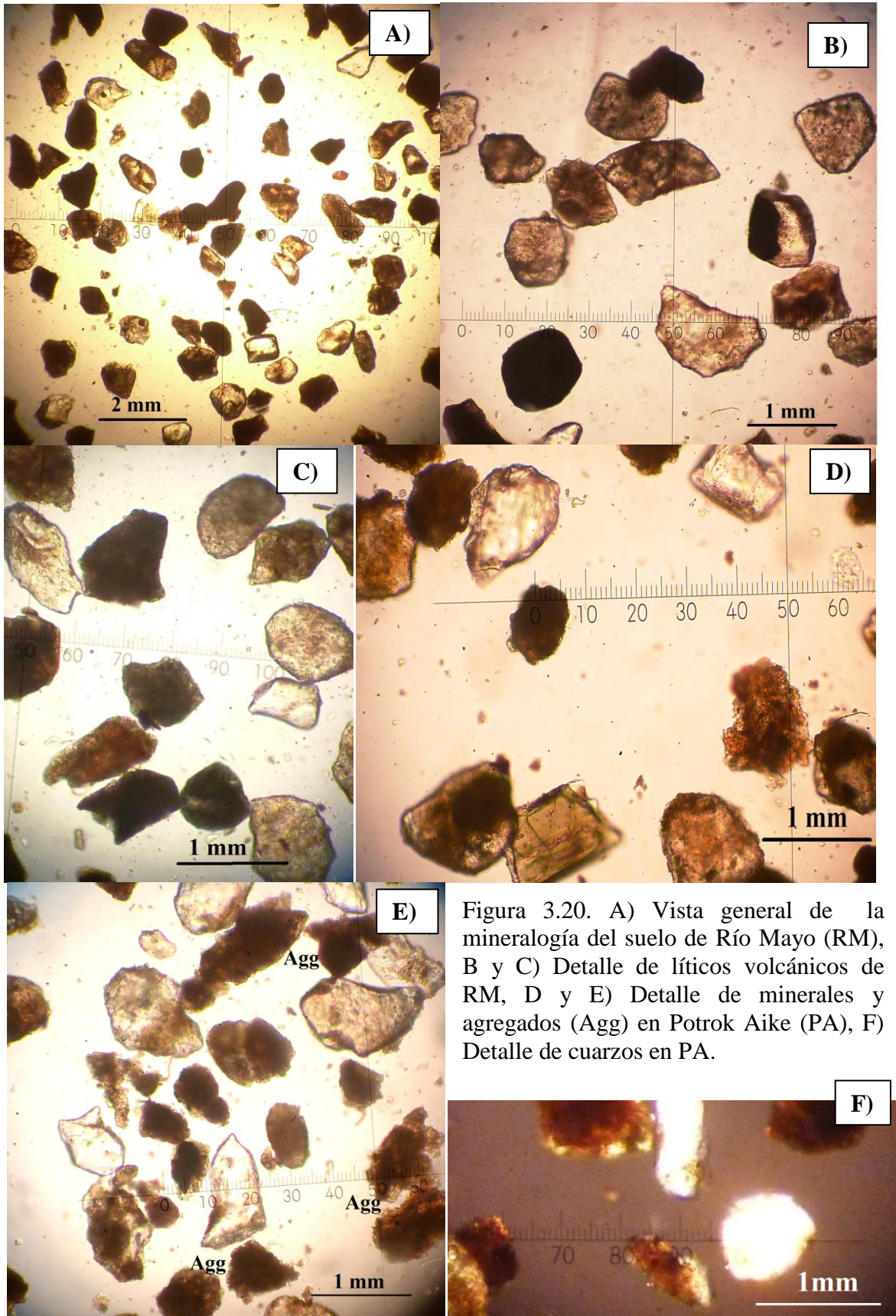


Figura 3.20. A) Vista general de la mineralogía del suelo de Río Mayo (RM), B y C) Detalle de líticos volcánicos de RM, D y E) Detalle de minerales y agregados (Agg) en Potrok Aike (PA), F) Detalle de cuarzos en PA.

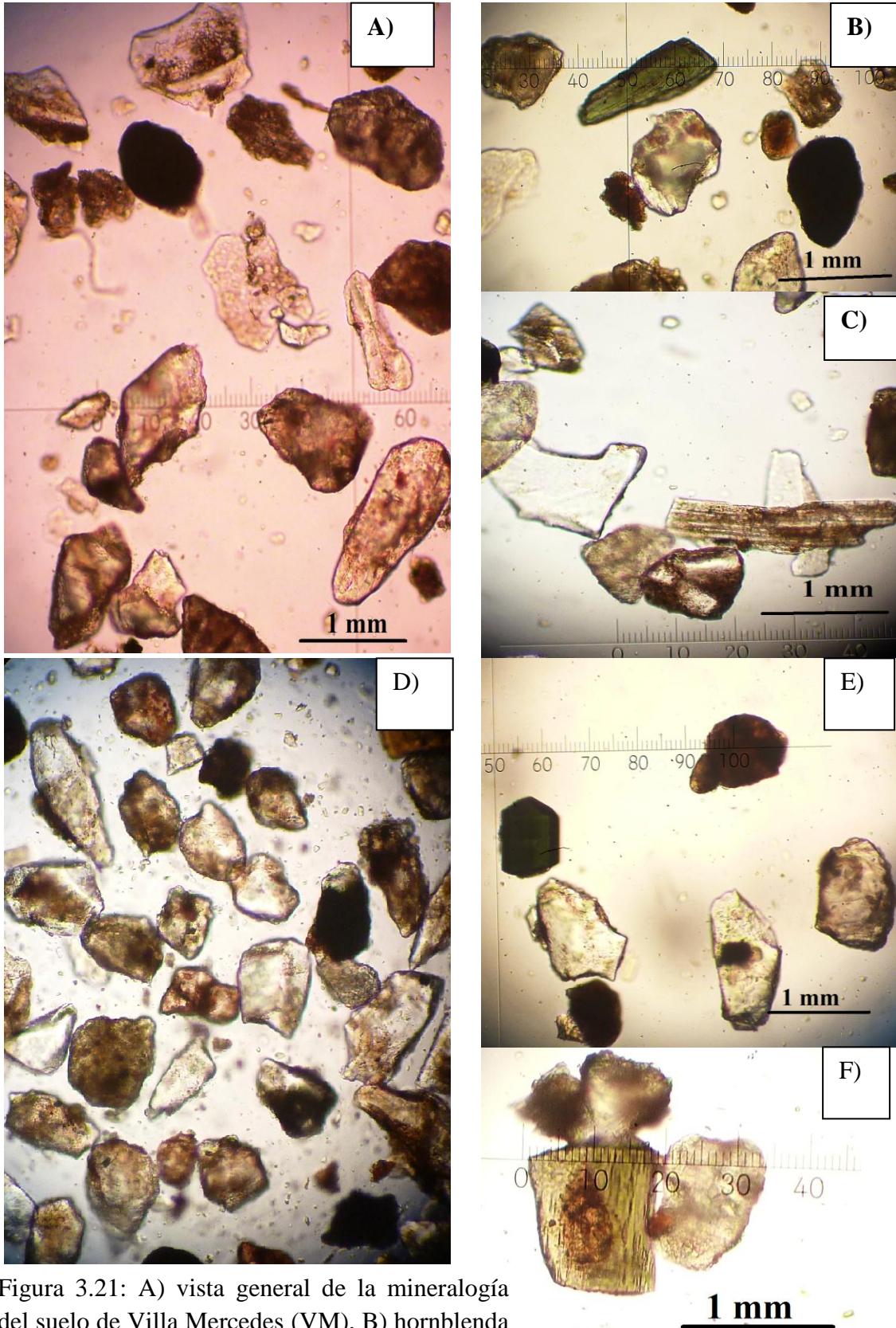


Figura 3.21: A) vista general de la mineralogía del suelo de Villa Mercedes (VM), B) hornblenda común (VM), C) vidrio fluidal (VM), D) vista general de Los Frentones (LF), E) hipersteno y cuarzo (LF) y F) hornblenda alterada y opaco.

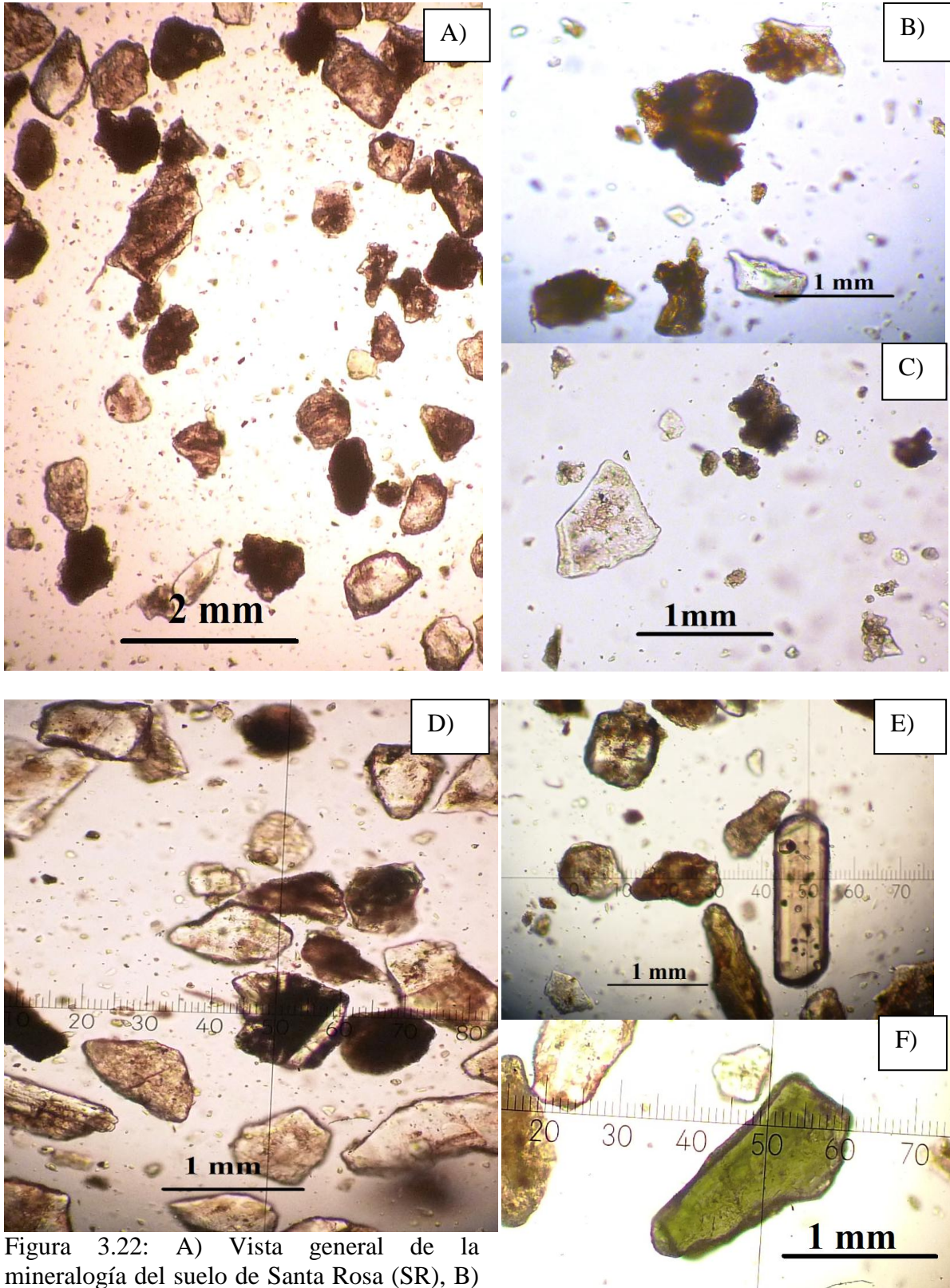


Figura 3.22: A) Vista general de la mineralogía del suelo de Santa Rosa (SR), B) agregados (SR), C) vidrio volcánico y agregado (SR), D) vista general de Anguil (AN), E) hipersteno y F) hornblenda (AN).

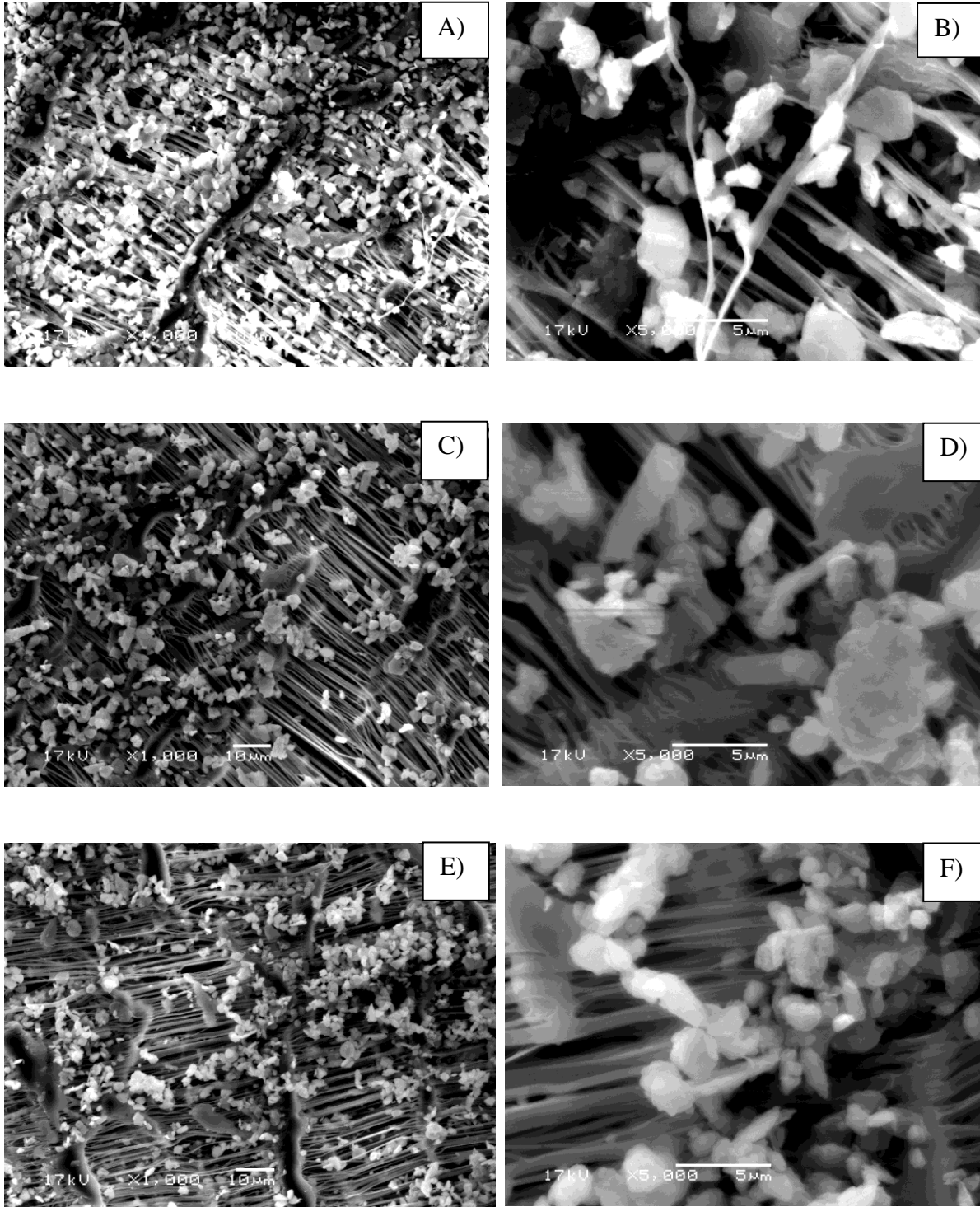


Figura 3.23. A) Vista general y B) detalles de las PM_{10} de Abra Pampa, C) vista general y D) detalles de las PM_{10} de Pilcaniyeu, E) vista general y F) detalles de las PM_{10} de Río Mayo.

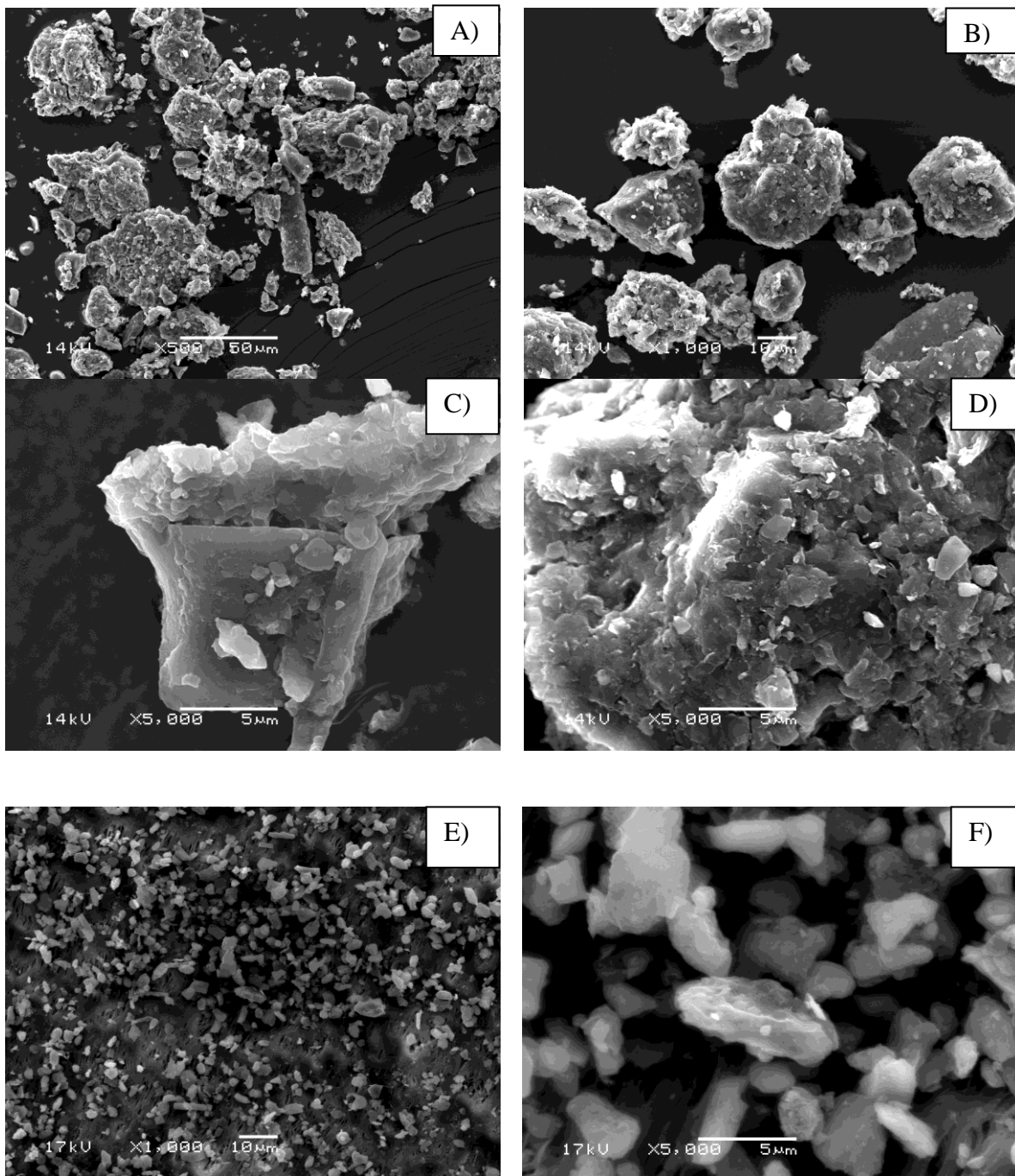


Figura 3.24. A) Vista general y B, C y D) detalles de las PM₁₀ de Potrok Aike, E) vista general y F) detalles de las PM₁₀ de Villa Mercedes (VM).

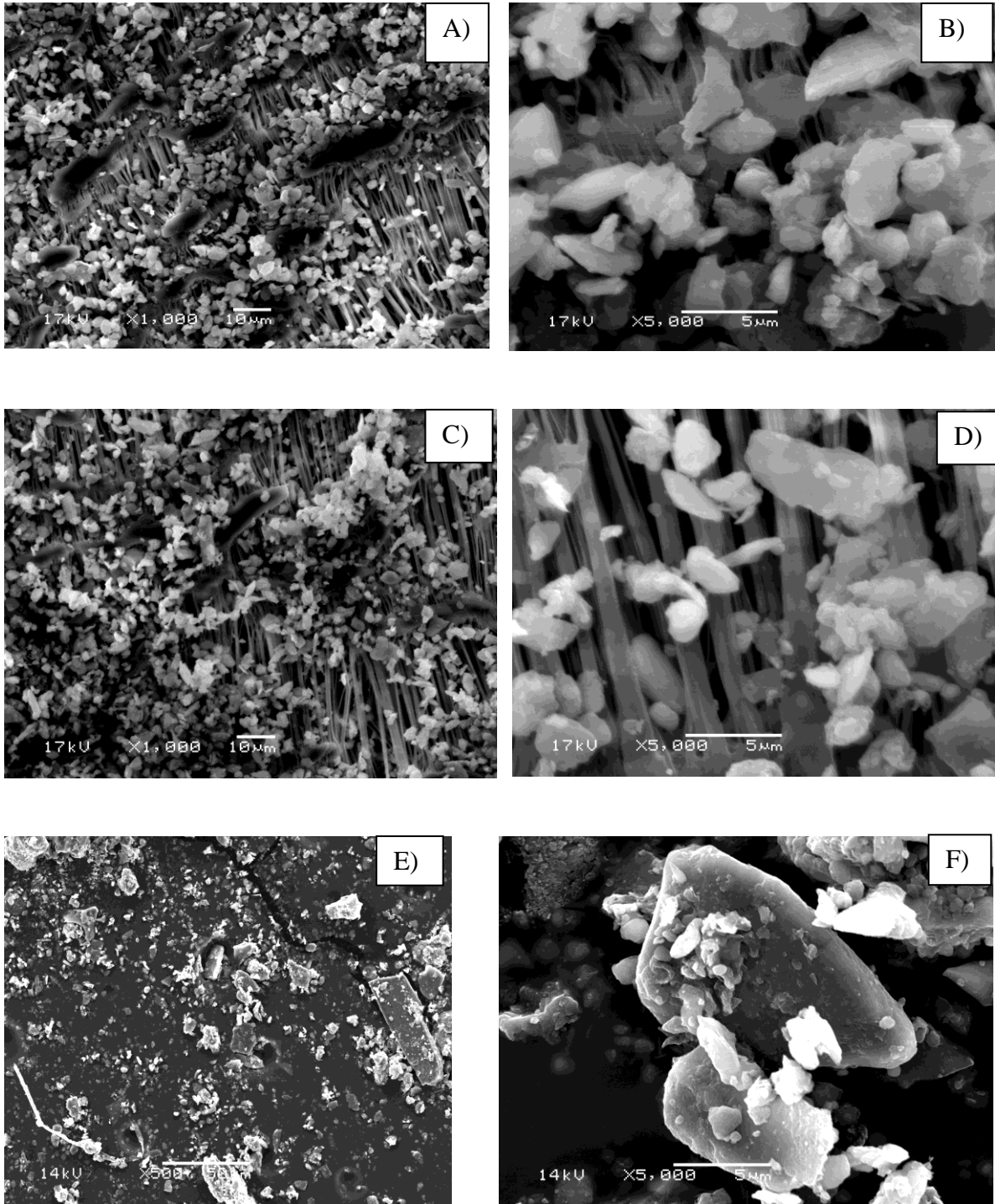


Figura 3.25. A) Vista general y B) detalles de las PM₁₀ de Los Frentones, C) vista general y D) detalles de las PM₁₀ de Santa Rosa, E) vista general y F) detalle de las PM₁₀ de Anguil.

De acuerdo a los resultados hallados en el ensayo de emisión, justamente PA era el suelo con más baja emisión de partículas finas, que se infería correspondía a la presencia de agregados. Estos detalles estarían validando la conclusión alcanzada.

Para los Ls, SR y AN, se observa que el material particulado está constituido por partículas de menor tamaño, en su mayoría limos finos (Figura 3.25 D y F, respectivamente) que le confieren, como se concluyó anteriormente, la mayor emisión de PM_{10} .

Con estos resultados se estaría validando la **H2**. *En las PM_{10} emitidas por suelos loésicos predominan agregados, en tanto que en las emitidas por suelos desarrollados sobre arenas eólicas y sedimentos terciarios predominan partículas minerales individuales.*

COMPOSICION QUIMICA DEL MATERIAL EROSIONADO

En la Figura 3.26 se pueden observar las concentraciones promedio de C y N en el material erosionado y en el Anexo 5 (Tabla B) las concentraciones halladas para cada tormenta. Las concentraciones de C y N en el material erosionado aumentaron con la altura de muestreo y al analizar todos los sitios, se halló diferencias significativas entre las concentraciones halladas a los 13,5 cm y las otras dos alturas, 50 y 150 cm ($n=74$, $p<0,0001$).

Las mayores concentraciones promedio de C y N se detectaron en PC a los 150 cm ($30,2 \text{ g kg}^{-1}$ y $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ respectivamente) y en AP a los 50 cm ($31,2 \text{ g kg}^{-1}$ para C y $2,3 \text{ g kg}^{-1}$ para N), mientras que los materiales de SR y LF tuvieron las menores concentraciones (Figura 3.26 A y B). Las mayores concentraciones en tormentas individuales también se obtuvieron en los mismos sitios, con datos en PC a los 150 cm de $49,3 \text{ g kg}^{-1}$ para C y $2,4 \text{ g kg}^{-1}$ para N en la tormenta del 16/01/2008 y en AP a los 50 cm de altura, con $43,1 \text{ g kg}^{-1}$ y $2,7 \text{ g kg}^{-1}$ para C y N respectivamente en la tormenta del 17/10/11. El aumento de C y N con la altura, estuvo relacionado con el transporte de material de granulometría más fina a mayor altura, como se observó anteriormente. Está comprobado que cuando disminuye el tamaño de los agregados,

aumenta la concentración de los elementos en los mismos (Aimar, 2002), por lo que a mayor altura se transportaría el material más enriquecido.

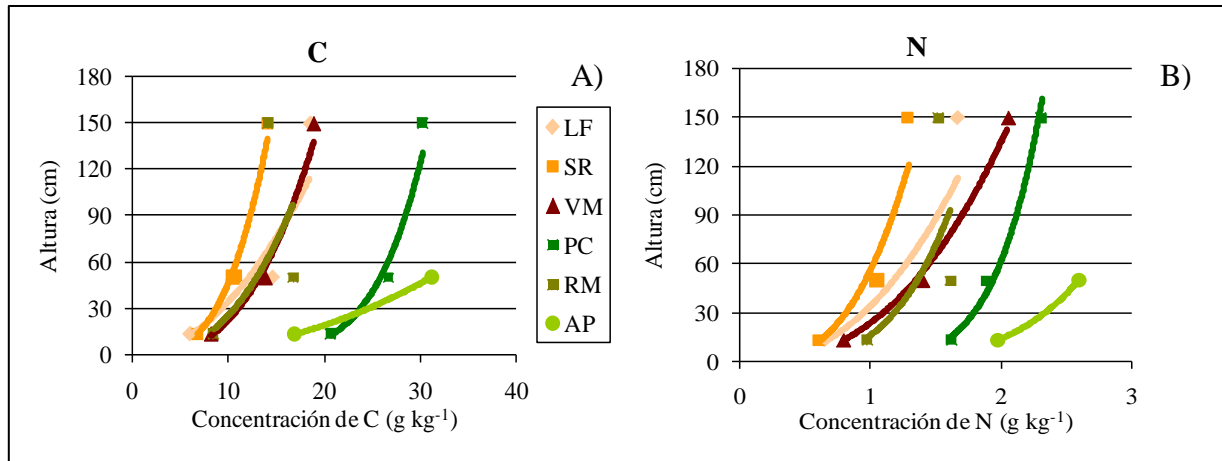


Figura 3.26. Concentración de A) carbono y B) nitrógeno en el material colectado a distintas alturas, en Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Es probable que los bajos valores de LF estén relacionados al bajo contenido de ambos elementos en el suelo original (Anexo 5, Tabla A). En cambio, los contenidos más elevados de C y N del suelo original de SR hicieron suponer que el material erosionado tuviese mayores concentraciones que las medidas en otros sitios. Sin embargo, los valores de C hallados en SR a los 150 cm variaron entre 11,3 y 18,5 g kg⁻¹. Es probable que estos valores bajos hallados en el material erosionado se debieran a que este suelo ha estado expuesto a la erosión eólica desde hace más de 20 años en forma continua. La calidad del material erosionado puede variar en el tiempo por cambios en la distribución del tamaño de agregados (Buschiazzo *et al.*, 2007). Cuando se instaló la parcela en el año 1995 donde se muestreó por primera vez el material erosionado, el material colectado a los 150 cm de altura tuvo concentraciones de hasta 28 g kg⁻¹ (Aimar, 2002). Las continuas labranzas para mantener la superficie sin cobertura durante dicho tiempo ha provocado la destrucción de los agregados y es probable que parte de las partículas más finas han sido trasladadas fuera de la parcela en eventos anteriores (Mendez *et al.*, 2006). Esto debido a que las fracciones orgánicas forman agregados de baja densidad (Barthès *et al.*, 2008) que son más vulnerables a ser transportados por erosión que las partículas minerales, por lo tanto se perderían en primer lugar (Lal, 2003). Es decir que

existiría un proceso de separación de acuerdo a las densidades. Las partículas orgánicas presentan una mayor relación volumen/densidad en el material transportado a mayor altura que en el suelo original. Esto ha sido demostrado a través de un escaneo en microscopio electrónico de polvo capturado a 3 m de altura (Buschiazzo y Funk, 2015). Por ello, el stock de C de un suelo que sufre proceso de degradación por EE disminuye. Se han medido pérdidas de hasta un 35 % (Buschiazzo y Taylor, 1993) o 28 % en un lapso de 19 años (Funk, 1995). Lyles y Tatarko (1986) determinaron que suelos de textura gruesa sometidos a EE podían perder un 0,53% anual de C.

También la EE contribuye a la redistribución por ejemplo de C en el paisaje, y está demostrado que en zonas erosionadas, la cantidad de C orgánico es significativamente menor que en áreas de deposición (Ritchie *et al.*, 2007). Por ejemplo, las pérdidas de material fino en tormentas previas habrían producido que el C se encuentre concentrado en agregados gruesos que han sido acumulados residualmente por erosión de los agregados más finos. Li *et al.* (2008b) encontraron evidencias de que la MO es el primer componente del suelo en ser erosionado y redistribuido por el viento. Los autores sugirieron que el contenido orgánico del material emitido desde una región puede decrecer a través del tiempo, lo que probablemente haya ocurrido en SR.

De todas formas, los valores de C y N hallados en PC y AP son superiores a aquellos medidos por primera vez en el material erosionado de SR. Seguramente porque parte del C y N en el material de los suelos Tc, estuvo aportado por el material orgánico joven o lábil, desde la vegetación natural existente en estos sitios, ya que los suelos originales poseen un 1,4 y 0,5 % respectivamente de MO. El transporte de partículas por saltación provoca también la degradación de la vegetación y pequeños trozos de material vegetal son transportados por el viento fácilmente por su baja densidad. La EE impacta el pool de C del suelo activo o lábil y para eventos erosivos prolongados o con vientos muy erosivos, se perderían lentamente el pool compuesto por complejos arcillo húmicos (Doetterl *et al.*, 2012). Otro factor que pudo influir en los altos contenidos de CO en PC, pudo haber sido el tratamiento recibido previo a la instalación de la parcela. Se ha comprobado que la emisión de partículas de un suelo donde la

biomasa ha sido quemada puede elevar los contenidos de CO en el material erosionado (Mahowald *et al.*, 2005). En la Figura 3.27 A y B se observa el aspecto del material transportado a los 13,5 cm en AP y PC, respectivamente, donde hubo presencia de abundante material vegetal. C y D en tanto, corresponden a LF y SR donde no se observan restos vegetales.

Se hallaron diferencias significativas entre la concentración de C y N de los Ls y Ar respecto a los Tc a 13,5 y 50 cm de altura ($n= 74$, $p<0.001$). A los 150 cm en tanto, las diferencias fueron halladas entre los Ls y Tc ($p< 0.05$).

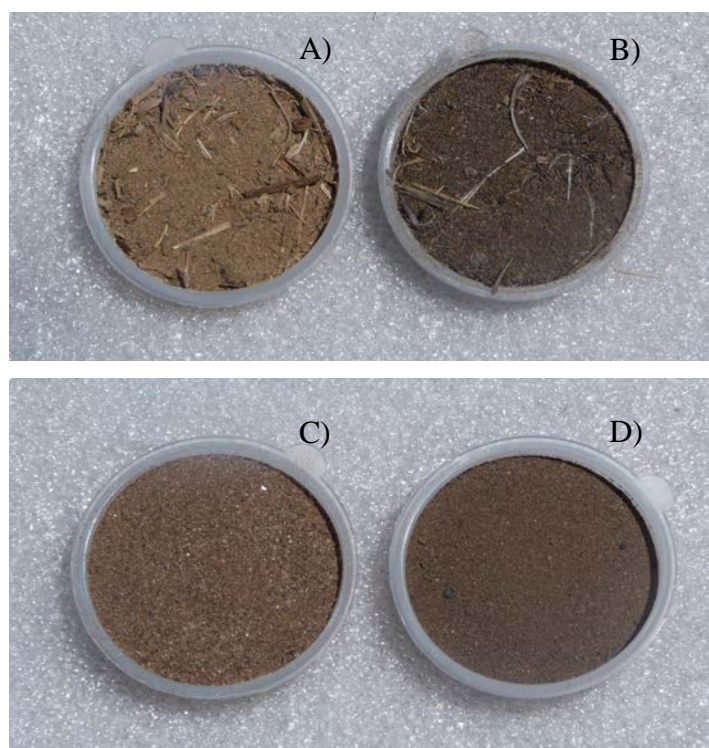


Figura 3.27. Aspecto general de la muestra transportada a los 13,5 cm de altura en A) Abra Pampa, B) Pilcaniyeru, C) Los Frentones y D) Santa Rosa.

Para C y N el material se encuentra enriquecido en todas las alturas y en todos los suelos a excepción de SR (Figura 3.28). C y N poseen TE que se ordenan en la siguiente secuencia: AP>PC>RM>LF>VM.

A los 50 cm de altura, las TE para C en RM, PC y AP fueron de 5,3, 7,5 y 10,6, respectivamente, mayores a las TE de N. Estos valores superaron a los informados por otros autores. Larney *et al.* (1998) encontraron en un suelo franco arcilloso de Alberta, Canadá, en muestreos efectuados a 25 cm de altura, TE más bajas, de hasta 1,4 para N total y en promedio de 1,05 para C, a la inversa de este estudio donde siempre fueron más elevadas las TE de C que las de N. Sterk *et al.* (1996) comprobaron que en Nigeria el material recolectado a 0,05 m de altura era semejante en su composición al suelo original, pero la TE a 0,5 m de altura era tres veces superior. Estos autores también demostraron que la principal masa de nutrientes era transportada por saltación aunque el material en suspensión estaba más enriquecido en esos elementos, con una TE a los 2 m de altura de 17 veces respecto al suelo original para C y N. Webb *et al.* (2012) en tanto, encontraron que el material recolectado a 2 m de altura en distintos sitios de Australia tenían una TE en C de 1,67 a más de 7.

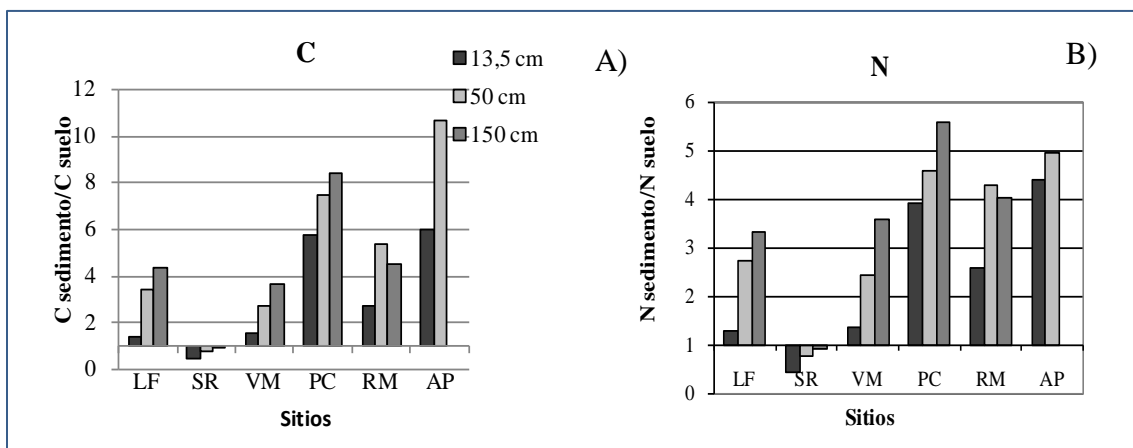


Figura 3.28. Tasa de enriquecimiento del material erosionado respecto al suelo original de A) carbono y B) nitrógeno para los sitios Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

El material de SR probablemente no estuvo enriquecido con respecto al suelo original debido a pérdidas de dichos elementos en eventos erosivos anteriores. En la Figura 3.29 se puede observar para C que en el año 1995 el material a los 50 cm de altura estaba levemente enriquecido de C y a los 150 cm poseía una TE promedio de 1,4 (Aimar, 2002).

Por otra parte, otros estudios llevados a cabo en la zona (cercana a SR) en suelos de igual textura y no degradados, determinaron TE para N de 2 a 5, en polvo transportado a los 0,13 y 1,5 cm de altura (Buschiazzo *et al.*, 2007). En el inicio del proceso erosivo, aún con vientos de baja energía se estaría transportando material enriquecido en C y N, ya que están principalmente concentrados en el estrato superficial del perfil. Otro factor que pudo influir es la concentración de los elementos en agregados de diferente tamaño. El modelo de jerarquía de agregados propone que la estructura del suelo surge de la agregación de partículas minerales finas en microagregados (53 a 250 μm) que posteriormente forman macroagregados (> 250 μm) con el aumento de la dependencia de los agentes orgánicos más transitorios (Tisdall y Oades, 1982).

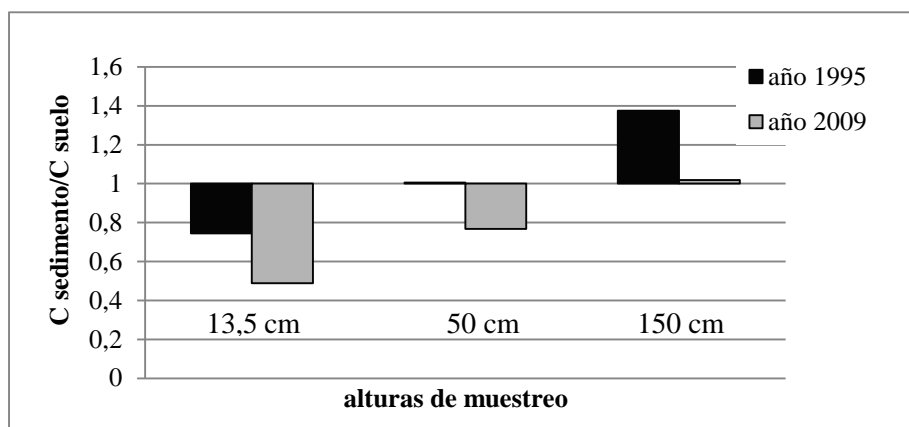


Figura 3.29. Tasa de enriquecimiento de C en el material erosionado en el año 1995 y 2009 en Santa Rosa.

Este modelo sugiere que la concentración de MO del suelo aumenta con el aumento de tamaño de los agregados y que la remoción del suelo expone a estos agentes de unión al ataque microbiano, con la consiguiente pérdida de la MO (Elliot, 1986). Por lo tanto, los suelos que carecen de perturbación mecánica como aquellos que están en condiciones naturales presentan formación de microagregados y estabilización del CO particulado, de 53 a 250 μm (Six *et al.*, 2000; Six *et al.*, 2002). Al producirse repetidas labranzas, como en el caso de la parcela de SR, se produciría pérdida de la MO del suelo, por una reducida oportunidad

para la formación de microagregados alrededor de un núcleo de CO particulado. Además, en las condiciones del ensayo, donde se mantuvieron los suelos sin vegetación, se produce la interrupción de la red de poros y la reposición del C orgánico disuelto por exudados de las raíces y la descomposición del CO particulado. Devine *et al.*, 2014 demostraron una menor proporción de macroagregados en sistemas donde se aplica labranzas. Otros estudios han comprobado que las partículas erosionadas de 106 a 500 μm de diámetro tenían entre 3 y 4 veces más CO que el suelo original y mayor concentración que las partículas de menor diámetro (Sankey *et al.*, 2012) y que las partículas más finas ($<50 \mu\text{m}$) pueden contener casi el 12 % del CO total y el 9 % del N total del suelo (Li *et al.*, 2009b). Las sucesivas labranzas en las parcelas sin cobertura pueden haber provocado la destrucción de macroagregados, aumento en las fracciones de agregados de menor tamaño y pérdidas de MO por mineralización.

Los contenidos de P fueron semejantes entre sitios, ya que no se hallaron diferencias significativas al comparar los suelos de acuerdo al origen (Figura 3.30 A). Las concentraciones variaron entre 0,06 a los 13,5 cm y 1,8 g kg^{-1} a mayores alturas. No fue posible explicar el alto contenidos de P hallado en AP a los 0,50 m (7,73 g kg^{-1}). Se hallaron diferencias significativas entre las concentraciones transportadas a 13,5 y 50 cm de altura ($n=74$, $p<0,05$), siendo mayores las concentraciones halladas a mayor altura.

Resultados semejantes fueron hallados para S, donde tampoco hubo diferencias significativas entre Ls, Ar y Tc, aunque las mayores concentraciones de S en el material erosionado se hallaron en los Ls y Ar. Las concentraciones variaron desde 0,04 (a los 50 cm en AP) a 0,98 g kg^{-1} (a los 150 cm en VM). Las concentraciones a los 13,5 cm presentaron diferencias con respecto a las de los 50 y 150 cm de altura ($n= 74$, $p<0,05$). Al igual que con C y N, en la mayoría de los eventos la concentración de S en el material aumentó con la altura de transporte, pero en algunas tormentas de VM y SR el material más concentrado se halló a los 13,5 o 50 cm de altura (Anexo 5, Tabla B).

Las mayores concentraciones de Ca fueron halladas en el material erosionado a los 50 cm de altura en la mayoría de los eventos. Esto se debería a que el Ca se encuentra

mayormente como calcita y tiende a formar agregados de tamaño relativamente grande como limos gruesos o arenas finas (Buschiazzo, 2014) y su variabilidad dependerá de la abundancia del elemento en el material original (Van Curen y Cahill, 2002). Analizando agregados de diferente tamaño de un Haplustol y un Ustipsammente de La Pampa, se ha demostrado que el Ca tiende a concentrarse en agregados de 50 a 74 μm de diámetro, disminuyendo su concentración en los agregados de menor y mayor tamaño (Aimar, 2002). Los agregados menores a 2 μm son los de más baja concentración.

De allí que el material transportado a 150 cm, tenga menor cantidad de Ca que el de los 50 cm de altura. Los menores valores hallados correspondieron al material erosionado a los 13,5 cm en LF (0,12 g kg^{-1}) y los más altos se encontraron en el material de los 50 cm de altura de PC (7,63 g kg^{-1}). A los 13,5 cm de altura, la concentración de Ca de los suelos Ls y Ar presentaron diferencias significativas con respecto a la hallada en los Tc, que fueron mayores ($n=74$, $p<0,003$). A los 50 y 150 cm de altura las diferencias se encontraron entre Ls y Tc ($n=74$, $p<0,05$). Los Ar no se diferenciaron de los otros.

Las concentraciones de Mg variaron entre 1,18 g kg^{-1} para LF a los 13,5 cm y 6,68 g kg^{-1} en PC a los 150 cm de altura. En la gran mayoría de los eventos, la concentración aumentó con la altura, aunque las concentraciones del material erosionado a los 50 y 150 cm de altura fueron muy similares, principalmente en los Tc y Ar. De acuerdo al origen sólo se hallaron diferencias significativas entre los Ls y Tc a los 13,5 cm de altura ($n=74$, $p<0,05$). Al igual que para Ca, los mayores valores correspondieron a los suelos Tc.

Las menores concentraciones de K en el material erosionado fueron halladas en el Ar (0,49 g kg^{-1} a los 13,5 cm de VM) seguido por los Tc. Los valores más altos en tanto, correspondieron a los Ls, con concentraciones de hasta 11,07 g kg^{-1} en el material transportado a los 150 cm en SR o de 16,42 g kg^{-1} a los 50 cm en LF. En la mayoría de los eventos, el material transportado a mayor altura presentó mayor contenido de K, no obstante se observó para las tormentas del 04/09/2007, 22/09/2008 y 07/10/2008 de LF; la del 19/01/2006 de SR y

también las del 04/02 y 02/03/2010 de PC una mayor concentración de K a los 50 cm de altura.

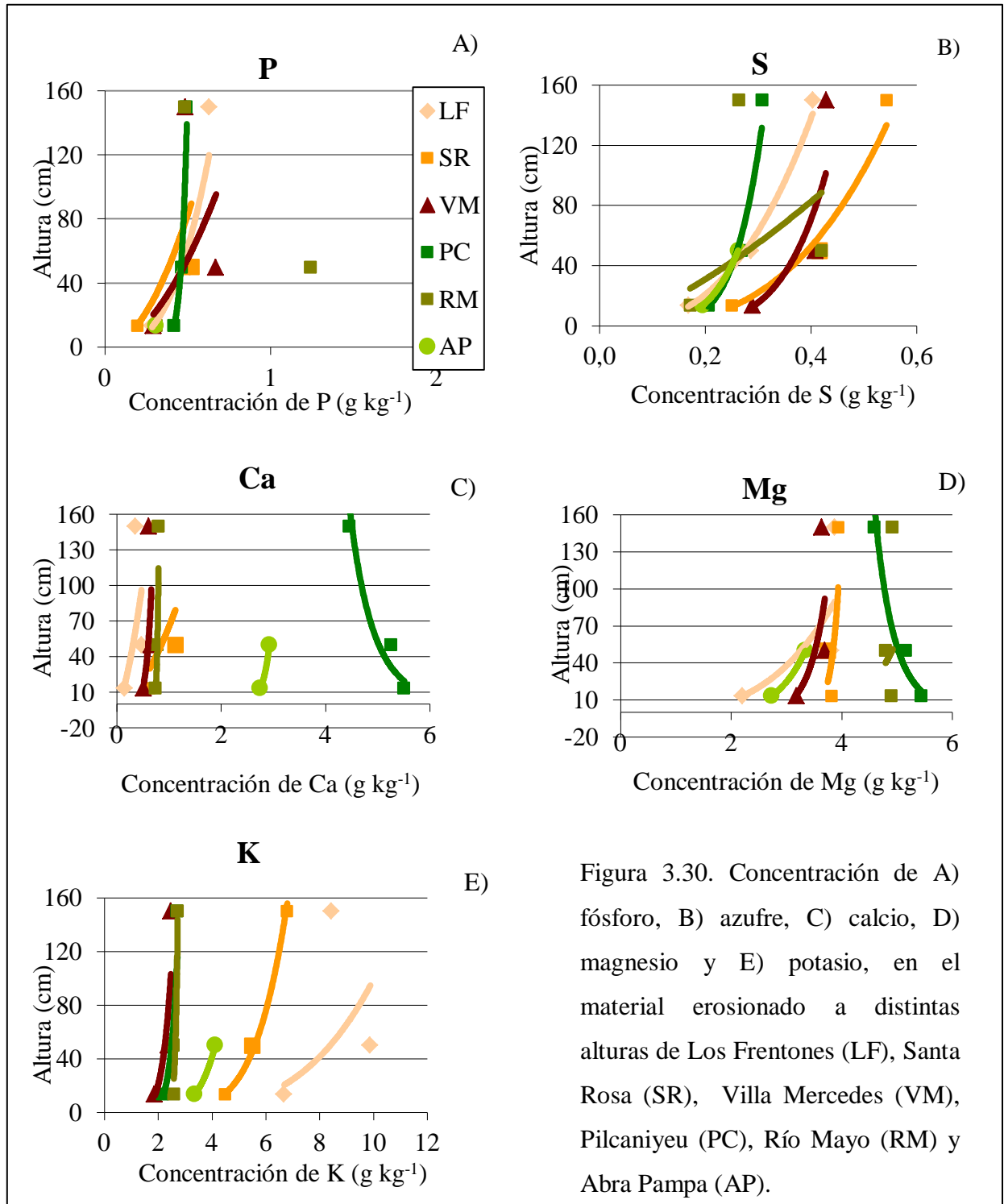


Figura 3.30. Concentración de A) fósforo, B) azufre, C) calcio, D) magnesio y E) potasio, en el material erosionado a distintas alturas de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Si bien estudios anteriores demostraron una relación inversa entre contenido de K y tamaño de agregados (Aimar, 2002), estos datos hallados podrían deberse a una mayor concentración de K en agregados de mayor tamaño, semejante a lo que ocurre con Ca. Stankey *et al.*, (2012) hallaron que el material erosionado < a 63 y de 63 a 106 μm de diámetro tenían menor concentración de Ca, Mg y K que los agregados entre 106 y 500 μm . A las tres alturas consideradas se hallaron diferencias significativas entre los Ar y Tc con respecto a los Ls que presentaron las mayores concentraciones en el material erosionado ($n=74$, $p < 0,005$). Estas diferencias probablemente se deban a que el K es un mineral constituyente del material parental de los Ls, ya que está comprobado que poseen abundante arcilla illítica en su composición (Iturri y Buschiazzo, 2014).

Las TE de P del material recolectado a 13,5 cm de altura presentó valores negativos para LF, SR y RM, observándose enriquecimiento para los restantes suelos y las otras alturas muestreadas (Figura 3.31 A). Visser *et al.* (2005) hallaron en el material erosionado en Burkina Faso, TE para P entre 0,44 y 3,04, semejantes a las halladas en este estudio.

Para S en tanto, se observó que a excepción de RM y AP, ninguno de los materiales estuvo enriquecido (Figura 3.31 B). Dado que C, N, P y S son elementos relacionados a las fracciones orgánicas, se esperaba un comportamiento semejante entre ellos. Sin embargo S no se halló concentrado en el material erosionado respecto al suelo original.

Ca, Mg y K tuvieron TE positivas en todas las alturas y suelos (a excepción de PC y los 13,5 cm de AP donde se hallaron valores negativos para Mg). El material erosionado en los Tc, tuvieron las TE más altas para Ca, llegando a ser de 3 y 5 veces mayores para PC y AP respectivamente, que los hallados para los Ls y Ar. Dado que los agregados de tamaño intermedio son los que generalmente tienen la mayor concentración de Ca (Aimar, 2002) no se observó para este elemento un incremento de las TE con la altura (Figura 3.31 C). Por ejemplo para los Ls, Ar y AP la mayor TE se halló a los 50 cm de altura y para PC a los 13,5 cm.

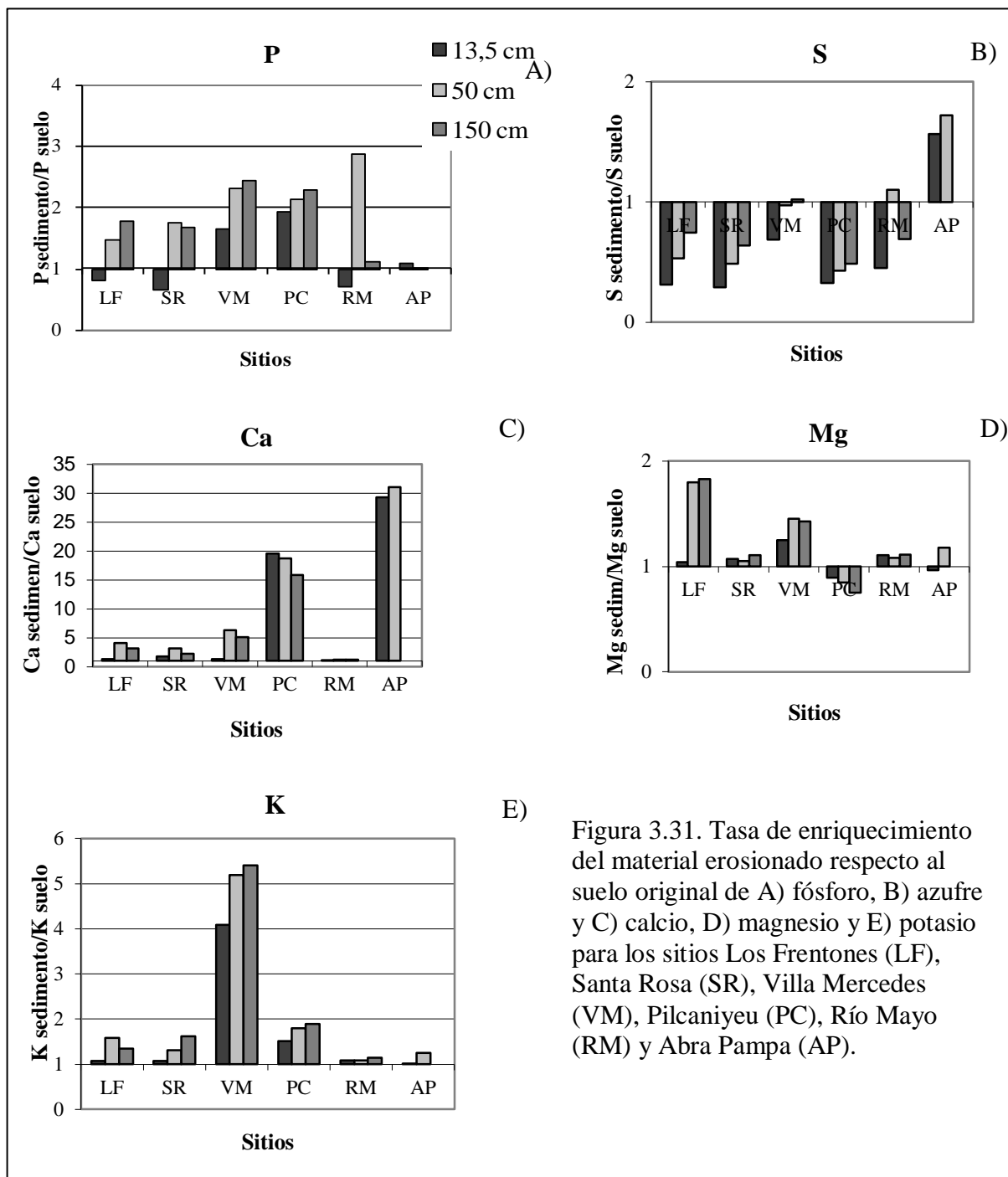


Figura 3.31. Tasa de enriquecimiento del material erosionado respecto al suelo original de A) fósforo, B) azufre y C) calcio, D) magnesio y E) potasio para los sitios Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

El material erosionado de LF tuvo la TE más alta para Mg, llegando a ser más del doble que la hallada para los restantes suelos (Figura 3.31 D). El material más enriquecido en K, fue el erosionado desde el suelo Ar (VM), con material de 4 a más de 5 veces concentrado

respecto al suelo original. Ello debido a que VM tuvo el menor contenido de K en el suelo original ($456,9 \text{ mg g}^{-1}$). En los restantes suelos, las TE fueron menores de 2 (Figura 3.31 E).

Las concentraciones de Fe, Mn, Zn y Cu fueron mayores en los materiales erosionados de los suelos Tc. En la mayoría de los casos las concentraciones promedio de los elementos aumentaron con la altura (Figura 3.32).

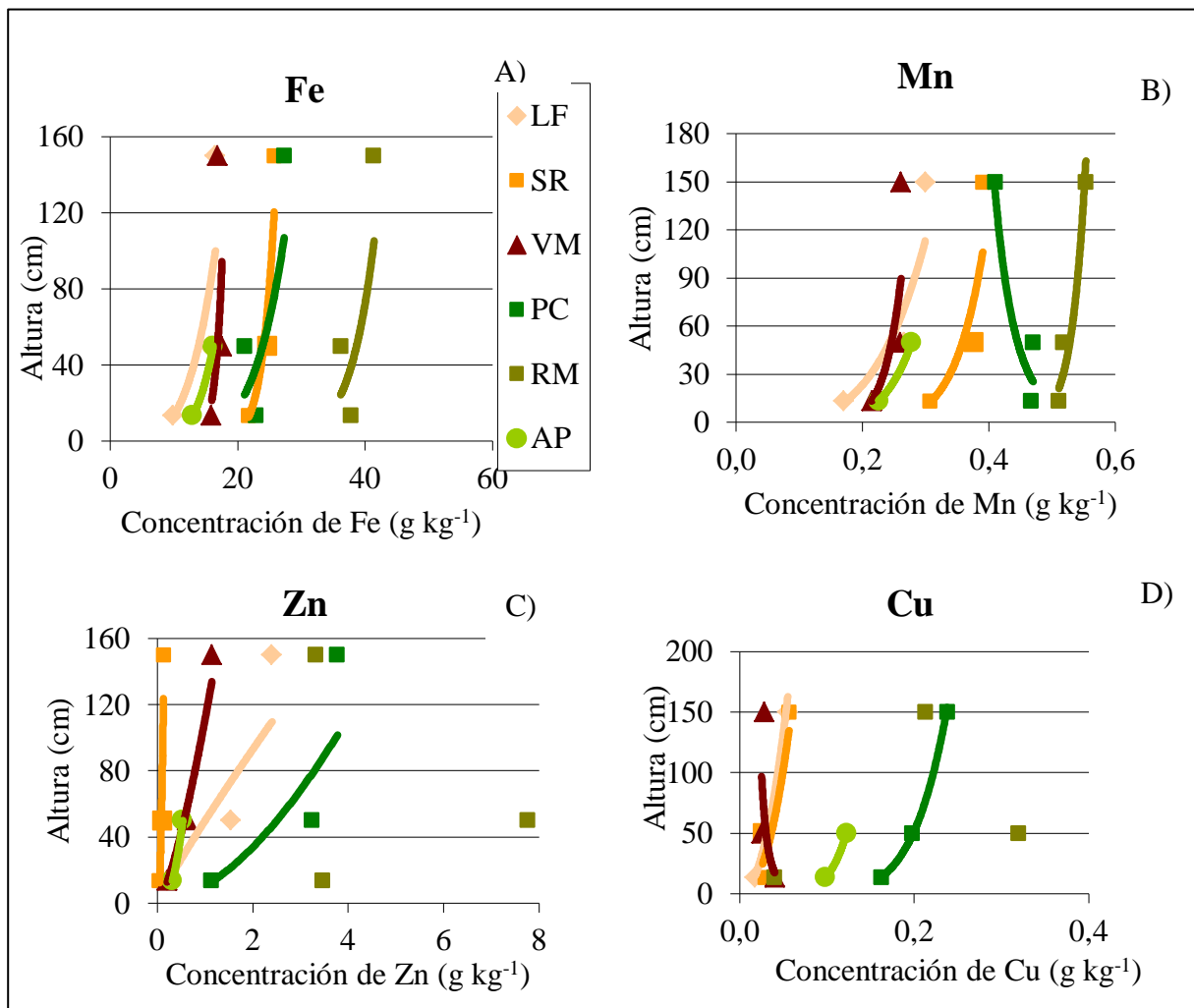


Figura 3.32. Concentración de A) hierro, B) manganeso, C) zinc y D) cobre, en el material erosionado a distintas alturas de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

Al analizar los eventos individualmente se observó que para algunas tormentas de VM y PC, el material erosionado a los 50 cm tuvo mayor concentración de Fe. Igual tendencia se observó en esos sitios y SR para Mn y Cu (Anexo 5, Tabla B). Las concentraciones en el material erosionado se ordenaron en la secuencia Fe>Zn>Mn>Cu y las mayores fueron de 60,5 g kg⁻¹ de Fe en PC, de 19,3 g kg⁻¹ de Zn en RM, de 0,62 g kg⁻¹ de Mn en PC y 0,73 g kg⁻¹ de Cu en RM. Sin embargo en el material original, los contenidos fueron de Fe>Mn>Zn>Cu. Las más altas concentraciones de Zn que de Mn en el material erosionado, pudieron deberse tal vez, a contaminación con el material de construcción de los colectores. Por ello, los datos analizados en el presente trabajo debieran validarse con colectores fabricados con otro tipo de material. Las elevadas concentraciones de Fe en el material erosionado estarían relacionadas al material parental de los suelos. Van Curen y Cahill (2002) examinando composiciones de polvos atmosféricos indicaron que las concentraciones por ejemplo de Al, Fe y Mg estarían relacionadas a la presencia de abundantes minerales filosilicatados.

Las mayores TE de Fe, Mn y Zn se hallaron en LF, seguido por VM y luego los Tc (Figura 3.33). Para Fe se hallaron valores negativos en PC y RM. A pesar de que los mayores valores de Fe encontrados en el material erosionado correspondieron a dichos sitios, el material no estuvo enriquecido por los altos valores de Fe hallados en el suelo original (30,8 g kg⁻¹ tanto para PC como RM) (Figura 3.33 A). LF en tanto, presentó la mayor TE debido a que el suelo original tuvo las más bajas concentraciones de Fe (6,8 g kg⁻¹). La TE encontrada en LF a los 50 y 150 cm de altura (2,3 y 2,4 respectivamente) fue comparable a la hallada para polvo atmosférico (Lawrence y Neff, 2009). El material de SR y VM tuvieron TE de 1,3 y los Tc menores valores o no estuvieron enriquecidos.

Las TE halladas para Mn fueron menores, de 1,8 para LF y de 1,3 para los restantes suelos. Estas tendencias halladas también pueden estar relacionadas al material que se ha erosionado en cada suelo. En el caso de los suelos Tc, el material estuvo más enriquecido en partículas de mayor tamaño (de 2 a 250 µm) que para los Ar (2 a 100 µm) y Ls (2 a 75 µm). Stankey *et al.*, (2012) encontraron que tanto Fe como Cu se encuentran más concentrados en

agregados menores a 106 μm , lo que explicaría las TE más elevadas encontradas en LF que en los Tc.

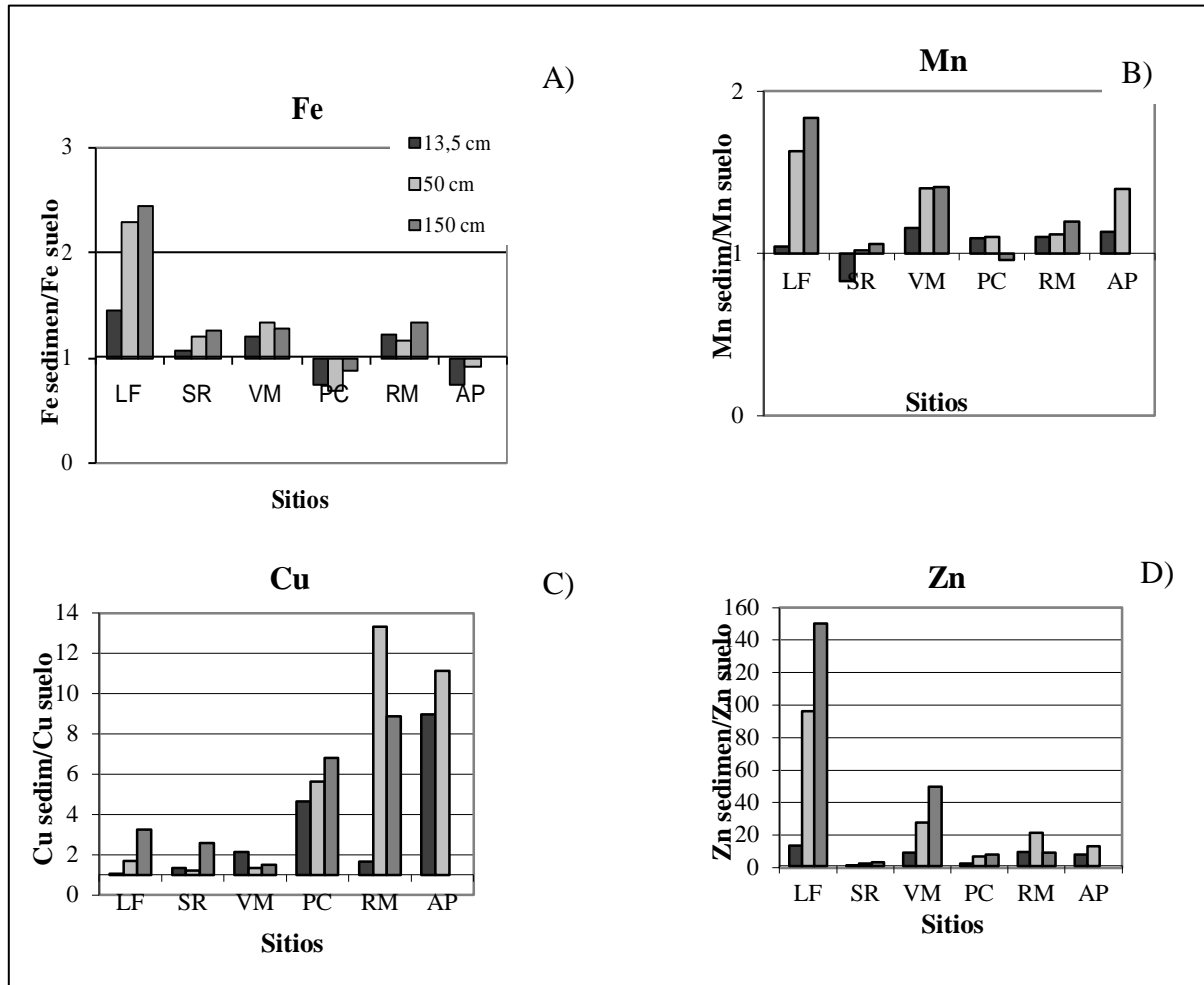


Figura 3.33. Tasa de enriquecimiento del material erosionado respecto al suelo original de A) hierro, B) manganeso, C) cobre y D) zinc, para los sitios Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Abra Pampa (AP).

El material erosionado de los Tc en tanto, estuvo más enriquecido en Cu que los Ls y Ar. Las TE fueron mucho más altas, fue mayor a 10 en RM y AP. Schütz y Rahn (1982) examinaron la relación existente entre concentraciones de elementos metálicos y tamaño de las partículas en suelos de África y Norte América y demostraron que elementos como Cu, Zn,

Ag, Au y As están concentrados en partículas menores a 10 μm de diámetro, tal vez por esa razón se encuentren TE tan elevadas para Cu y Zn, en relación a las halladas para los otros elementos. Sin embargo, y de acuerdo a la granulometría del material transportado, se esperaba para Cu la misma tendencia que la hallada para Fe. Las más altas TE fueron halladas para Zn, con valores que no han sido informados por bibliografía para Zn, ni para algún otro elemento. Por esta razón, se supone que tal vez hubo alguna contaminación de la muestra con el mismo material de fabricación de los colectores.

Distribución de elementos en agregados

En la gran mayoría de los eventos erosivos, el material erosionado presentó mayores concentraciones de elementos al aumentar la altura de transporte. La comparación de la concentración hallada de los elementos a 13,5 y 150 cm de altura, estarían indicando distintas tendencias que los elementos tienen de acumularse en las fracciones granulométricas. Para los suelos Ls, y considerando una escala de 10, la concentración de C, N, P y S en el material erosionado a 13,5 cm fue de 2 a 3 respecto a la concentración a los 150 cm (de 7 a 8). Igual tendencia se observó para C y N en el Ar. En tanto en los Tc, la concentración a baja altura fue más elevada (de 3 a 4) comparándola con la del material a 150 cm (6 a 7). Para Mg, K, Fe y Mn y en todos los suelos, la concentración en el material erosionado a 13.5 cm fue de 4 a 5 comparando con la erosionada a mayor altura (5 a 6), es decir que presentaron concentraciones más elevadas a bajas alturas con respecto a los otros elementos. Es decir, C, N, P y S estarían más concentrados que Mg, K, Fe y Mn en materiales de granulometrías más finas que serían principalmente transportados por suspensión, y que en proporción, el material erosionado cerca de la superficie tendría una menor concentración. Esto indicaría un mayor riesgo de erosión de estos elementos (C, N, P y S) fuera del área de aporte y principalmente en los Ls y Ar.

El Zn fue el elemento que tuvo la menor concentración en el material erosionado a baja altura ya que, a excepción de RM, fue menor a 2 comparado con la concentración de Zn a los 150 cm (mayor de 8). Tal vez por encontrarse principalmente concentrado en partículas menores a 10 μm (Schütz y Rahn, 1982), por lo que sería más fácilmente transportado fuera del área de aporte.

La mayoría de los estudios previos demostraron que los elementos están más concentrados en agregados de menor tamaño (Zenchelsky *et al.*, 1976; Zobeck *et al.*, 1989; Aimar, 2002; Li *et al.*, 2009a.; Masri *et al.*, 2003; Van Pelt y Zobeck, 2007), aunque otros hallaron que por ejemplo que el P, K, Ca, Mg y Mn presentaron mayor concentración en agregados de mayor tamaño (Stankey *et al.*, 2012). Esto podría explicar la relación entre las concentraciones para Mg y Mn, pero no así para P que tuvo un comportamiento semejante a C, N y S.

En la Figura 3.34 se observa la concentración de C, N, P y S en los agregados de los suelos de SR y RM. Las mayores concentraciones de los elementos se hallaron en los agregados de menor tamaño (< 50 μm de diámetro). La concentración de C y N en los agregados más finos fueron similares para ambos sitios, pero en los otros tamaños de agregados la concentración de C y N fue superior en el suelo de SR. Esto en concordancia con las cantidades de dichos elementos en el suelo original. En SR se halló 13850,0 mg kg^{-1} para C y 1368,2 mg kg^{-1} para N y en RM 3130,0 y 375,5 mg kg^{-1} , respectivamente. El material erosionado de RM, sin embargo, tuvo concentraciones altas de ambos elementos (Figura 3.26), en relación al bajo valor hallado en el suelo original. Esto corroboraría que en las muestras erosionadas de RM, hubo un aporte del MO lábil. En RM, la concentración en C y N fue inversamente proporcional al tamaño de los agregados, pero en SR los agregados que tuvieron menor concentración fueron los de 100 a 250 μm de diámetro, aumentando las concentraciones de C y N a medida que aumentó o disminuyó el tamaño de las fracciones granulométricas. Estas tendencias se deberían a que el suelo de SR presentó, para un mismo tamaño de fracción granulométrica, mayor agregación que el de RM (Figura 3.13).

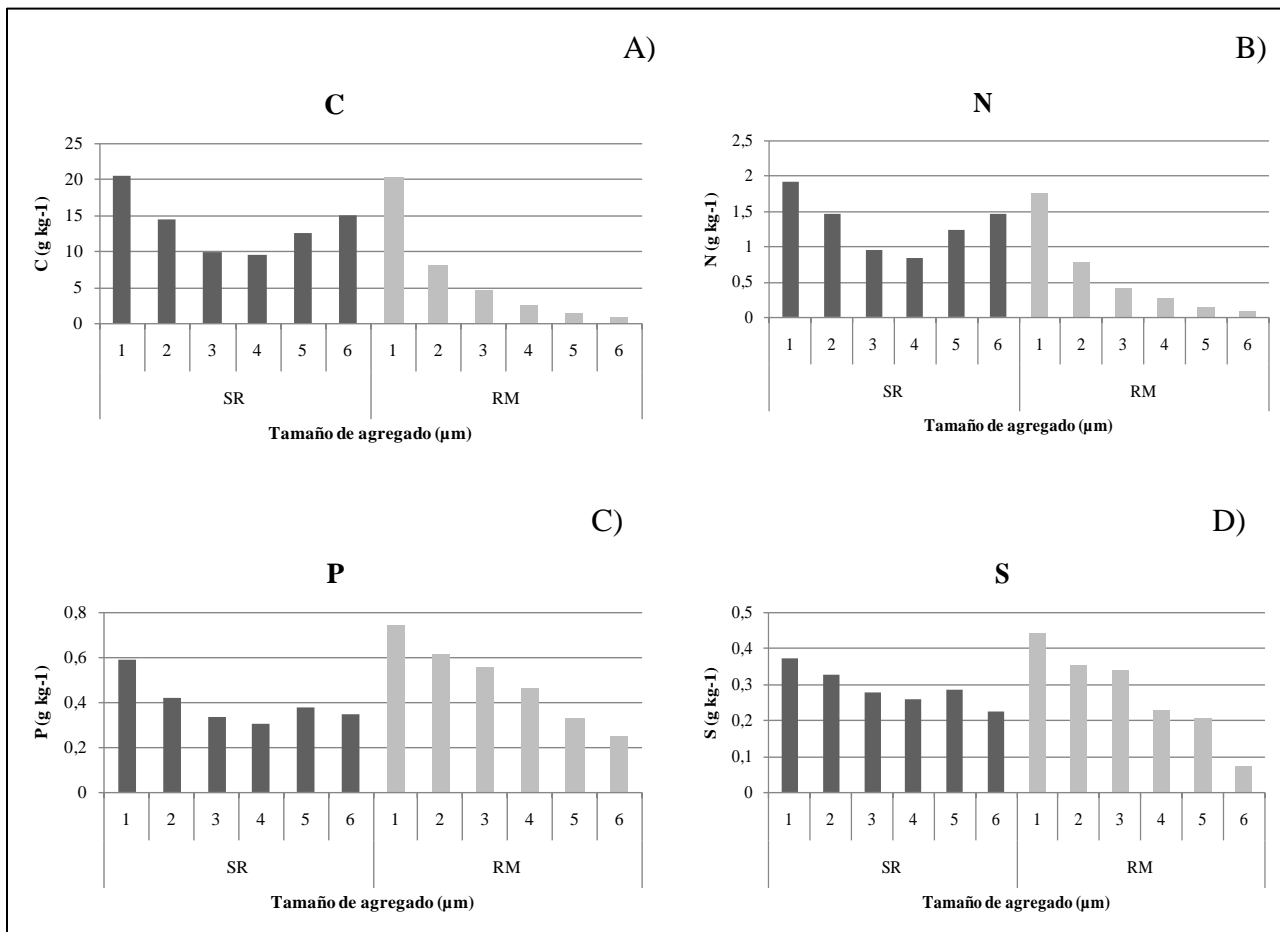


Figura 3.34. Concentración de A) carbono, B) nitrógeno, C) fósforo y D) azufre en los agregados de los suelos de Santa Rosa, (SR) y Río Mayo (RM). (1) agregados < a 50 μm de diámetro, (2) de 50 a 74 μm, (3) de 74 a 100 μm, (4) de 100 a 250 μm, (5) de 250 a 840 μm y (6) de 840 a 2000 μm de diámetro.

Las concentraciones de P y S fueron mayores en RM que en SR, para los agregados de menor tamaño (hasta 250 y 100 μm, respectivamente). Para P se halló la misma tendencia en los suelos originales, ya que dicha concentración fue de 432,0 mg kg⁻¹ para RM y de 295,2 mg kg⁻¹ para SR. En tanto con S ocurrió lo contrario, con cantidades de 381,5 y 853,2 mg kg⁻¹ para RM y SR, respectivamente. Para los agregados más gruesos los resultados fueron inversos (Figura 3.34 C y D). En RM las concentraciones de P y S aumentaron con la disminución del tamaño de los mismos (Li *et al.*, 2009a). Los agregados con menor concentración de P y S fueron los de 840 a 2000 μm, a excepción del P para SR, que la menor

concentración estuvo dada en los agregados de 100 a 250 μm de diámetro. La disminución de la concentración al aumentar el tamaño de las fracciones fue más marcada para RM. Los agregados con menor concentración de P y S de ese suelo (de 840 a 2000 μm de diámetro) tuvieron un 33 y 16% de la concentración del agregado más pequeño (<50 μm). En SR el contenido de P y S no fue tan variable entre las distintas fracciones granulométricas, ya que los agregados con menores concentraciones tuvieron un 51 y 60 % del contenido del agregado más concentrado. Esto indicaría que el suelo de SR perdería mayor calidad, aún con la degradación de fracciones más gruesas.

No obstante, los contenidos de S hallados en los agregados no explicaron las tendencias observadas para dicho elemento, en referencia a que en la mayoría de los casos el material transportado no se encontró enriquecido. Deberá analizarse más en detalle el origen de estas tendencias estudiando por ejemplo, como el elemento está concentrado en fracciones orgánicas e inorgánicas del suelo.

Las concentraciones de algunos elementos en el material erosionado a distintas alturas están relacionadas, es decir que en esos casos estarían acumuladas en las mismas fracciones y sus pérdidas serían proporcionales. Por ejemplo existe una correlación lineal altamente significativa entre C y N del material erosionado (Figura 3.35 A), probablemente porque ambos elementos están asociados a la materia orgánica del suelo. No ocurrió lo mismo con P y S que no presentaron ninguna relación entre ellos ni con los dos nutrientes antes mencionados, tal vez porque parte importante de P y S se encuentra en forma inorgánica.

Se hallaron también correlaciones lineales para Fe y Mn ($p < 0,001$), y Cu y Zn ($p < 0,001$), (Figura 3.35 B y C). Estas relaciones estarían indicando que dichos elementos se acumularían en las mismas fracciones granulométricas y sus pérdidas estarían condicionadas por el mismo mecanismo de erosión, ya que son equivalentes. Se esperaba que lo mismo ocurriera con Ca y Mg, pero entre estos elementos se encontró una relación logarítmica de menor ajuste que en los casos anteriores ($y = 0,731 \ln(x) + 4.297$, $r = 0,56$, $n = 58$, $p < 0.01$).

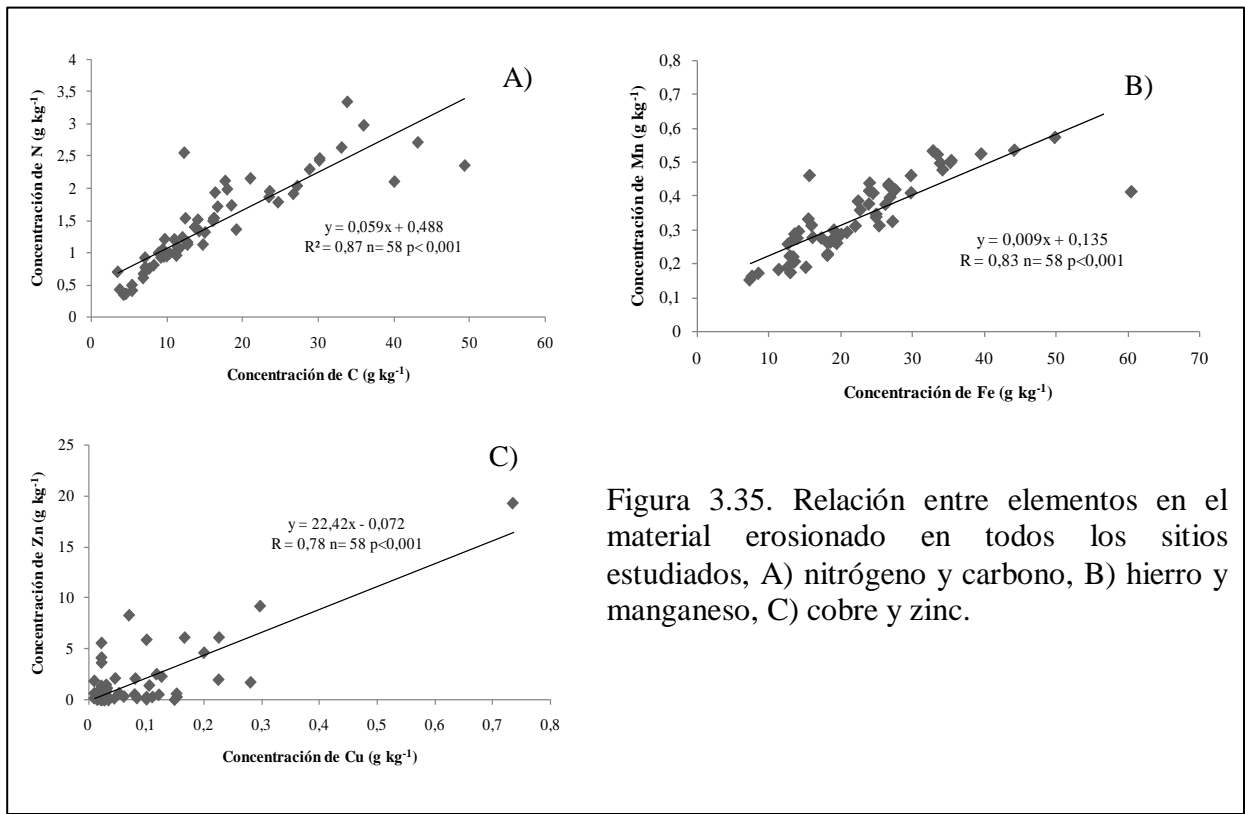


Figura 3.35. Relación entre elementos en el material erosionado en todos los sitios estudiados, A) nitrógeno y carbono, B) hierro y manganeso, C) cobre y zinc.

No se ha discutido los datos concernientes al As debido a que las mediciones, tanto en los suelos originales como en el material erosionado, no han sido sensibles para detectar diferencias. Tal vez habría que utilizar otra metodología diferente a la descrita en este estudio.

La concentración de elementos en el material erosionado de los Tc fue la más elevada para la mayoría de los elementos (C, N, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu) pero las magnitudes erosionadas fueron marcadamente más bajas que en los Ls y Ar. Esto no permite validar la **H6**. *Los suelos desarrollados sobre sedimentos terciarios, por poseer texturas más gruesas y/o estar en regiones climáticas de mayor erosividad, pierden, en términos absolutos, mayor cantidad de elementos que los desarrollados sobre loess o arenas eólicas.* Esto puede comprobarse por ejemplo para C, considerando el flujo de C en 5 tormentas analizadas para SR, LF, VM y PC. Las pérdidas fueron, en forma decreciente, en SR (728,6 g m⁻¹) > LF (258,3

g m^{-1})>VM (102,9 g m^{-1})>PC (71,3 g m^{-1}). Las mayores pérdidas de los restantes elementos también se ordenaron en la misma secuencia Ls>Ar>Tc.

Las pérdidas de C para SR superarían la tasa promedio anual calculada para el NE de Alemania que fue de 117 kg ha^{-1} (Funk, 2013, citado por Buschiazzi y Funk, 2015). Dado que en estos casos representaron sólo la pérdida de 5 tormentas, en los Ls y Ar se superaría ampliamente el límite de pérdida de C permisible regulado por EEUU establecido en 75 kg ha^{-1} . Otros estudios realizados en áreas de pastizales naturales de Mongolia determinaron pérdidas de CO entre 17 y 134 kg ha^{-1} de CO, dependiendo de la altura de las plantas (Hoffman *et al.*, 2008), en la India de 45,9 kg ha^{-1} (Santra *et al.*, 2013) y en China entre 53 y 1044 kg ha^{-1} (Wang *et al.*, 2006). Las mediciones en PC se corresponderían con los valores más bajos hallados en Mongolia.

Tampoco fue posible validar totalmente la **H5**. *El material erosionado desde suelos loésicos, al poseer una mayor concentración de sustancias orgánicas, se encuentra enriquecido en elementos como carbono, nitrógeno y azufre, mientras que el erosionado desde suelos desarrollados sobre arenas eólicas y sedimentos terciarios, al poseer menor concentración de sustancias orgánicas, se encuentran enriquecidos en elementos asociados a fracciones inorgánicas, como fósforo, calcio y magnesio, entre otros.* Esto se debió a que las concentraciones de la mayoría de los elementos fue mayor en el material erosionado de los Tc, entre ellos, el C y N. Probablemente por el aporte orgánico desde la vegetación natural. En el caso de K, las concentraciones fueron mayores en los Ls, contrario a la hipótesis planteada y se debería a la presencia de arcillas de tipo illítica en estos suelos.

Relación entre concentración de elementos y parámetros climáticos

En la Tabla 3.6 se observan las regresiones múltiples halladas entre las concentraciones de los elementos a las tres alturas y en todos los sitios y los parámetros climáticos, duración de

las tormentas (Dur) con velocidad del viento promedio (V_p), velocidad de viento media en el período de excedencia (V_{mPE}) y velocidad máxima en período de excedencia (V_{MaPE}).

Las concentraciones de C y N en el material erosionado, se correlacionaron positivamente con la duración de los eventos erosivos y las tres velocidades consideradas a los 150 cm de altura. También se encontraron correlaciones con Mg considerando el material transportado a los 13,5 y 50 cm de altura, Mn a los 50 cm y Cu a los 150 cm de altura. El único elemento cuyo material erosionado presentó correlación con los parámetros climáticos, a las tres alturas, fue el Ca (Tabla 3.6).

La combinación del aumento en la duración de la tormenta y la velocidad del viento provocarían un aumento en las concentraciones de los elementos. Con velocidades de viento más altas, partículas de arenas de diferente tamaño son transportadas horizontalmente por saltación. Este movimiento, genera movimientos de otras partículas (Shao y Raupach, 1993) ya que el golpeteo a través de la superficie, puede desprender arcilla y limo fino que son más difíciles de movilizar, ya que generalmente están unidas a través de fuerzas cohesivas (Grini y Zender, 2004; Okin, 2005). El tamaño de las partículas y la energía de saltación y la fuerza y el tiempo con que se bombardeó la superficie, pueden influenciar en la cantidad de partículas (Grini y Zender, 2004) y su calidad. Por este motivo, cuando la duración de la tormenta es más prolongada y con vientos de mayor velocidad, la capacidad de transporte aumentaría removiendo la capa superficial con material que presenta mayor concentración de los elementos y además se estarían movilizandopartículas disgregadas de menor tamaño y mayor concentración.

No se hallaron correlaciones significativas entre la concentración de S y los parámetros climáticos. El S puede presentarse en forma orgánica asociada a agregados de menor tamaño y menor densidad o en forma inorgánica, constituyendo agregados de mayor tamaño. Es probable que la falta de correlación se deba a esa variabilidad en el contenido de acuerdo a la fracción granulométrica.

Tabla3.6. Ecuaciones de regresión múltiple entre las concentraciones de elementos en el material erosionado a distintas alturas, para todos los sitios, y parámetros climáticos.

Altura muestreo (cm)	Ecuación de la regresión múltiple	Ajuste (% de explicación del modelo)
13,5	$C = 6,00535 + 0,00277476 * Dur - 0,0937917 * Vp$	P < 0,01 (66,9)
13,5	$C = 1,42916 + 0,00263654 * Dur + 0,157437 * VmPE$	P < 0,01 (67,4)
13,5	$C = 4,83967 + 0,00269119 * Dur + 0,00576387 * VMaPE$	P < 0,01 (66,4)
150	$C = 14,0793 + 0,0035999 * Dur - 0,143742 * Vp$	P < 0,01 (61,5)
150	$C = 10,2972 + 0,00343775 * Dur + 0,0971185 * VmPE$	P < 0,01 (61,1)
150	$C = 14,3455 + 0,003503 * Dur - 0,0630244 * VMaPE$	P < 0,01 (61,1)
150	$N = 1,63196 + 0,000195491 * Dur - 0,0248955 * Vp$	P < 0,01 (52,2)
150	$N = 1,87961 + 0,000182507 * Dur - 0,0236234 * VmPE$	P < 0,05 (50,4)
150	$N = 2,09308 + 0,000185108 * Dur - 0,0248236 * VMaPE$	P < 0,01 (54,4)
13,5	$Ca = 0,174274 + 0,000660015 * Dur - 0,0184531 * Vp$	P < 0,01 (71,5)
13,5	$Ca = -1,02915 + 0,000627926 * Dur + 0,0442947 * VmPE$	P < 0,01 (72,7)
13,5	$Ca = -0,352293 + 0,00063803 * Dur + 0,0111035 * VMaPE$	P < 0,01 (71,3)
50	$Ca = -0,00912452 + 0,000503783 * Dur + 0,0208963 * Vp$	P < 0,01 (72,4)
50	$Ca = -0,990121 + 0,000504489 * Dur + 0,0534758 * VmPE$	P < 0,01 (75,1)
50	$Ca = -0,548038 + 0,00051084 * Dur + 0,0254461 * VMaPE$	P < 0,01 (73,1)
150	$Ca = -0,0234187 + 0,000388132 * Dur + 0,0113713 * Vp$	P < 0,01 (63,7)
150	$Ca = -0,382043 + 0,000389975 * Dur + 0,0216696 * VmPE$	P < 0,01 (64,2)
150	$Ca = -0,732796 + 0,000385218 * Dur + 0,027862 * VMaPE$	P < 0,01 (66,0)
13,5	$Mg = 2,45617 + 0,000502567 * Dur + 0,00927799 * Vp$	P < 0,01 (56,2)
13,5	$Mg = 3,22843 + 0,000521401 * Dur - 0,0296184 * VmPE$	P < 0,01 (56,9)
13,5	$Mg = 1,79637 + 0,000496375 * Dur + 0,0254286 * VMaPE$	P < 0,01 (57,2)
50	$Mg = 2,94461 + 0,000390879 * Dur + 0,0408864 * Vp$	P < 0,01 (51,0)
50	$Mg = 3,59251 + 0,000431487 * Dur - 0,00936778 * VmPE$	P < 0,01 (48,4)
50	$Mg = 4,02244 + 0,000438395 * Dur - 0,021396 * VMaPE$	P < 0,01 (49,3)
150	$Fe = 2,93486 + 0,00303354 * Dur + 0,512588 * VMaPE$	P < 0,05 (42,0)
50	$Mn = 0,110013 + 0,0000220792 * Dur + 0,00661103 * VMaPE$	P < 0,01 (47,0)
150	$Cu = 0,0181988 + 0,0000383246 * Dur + 0,000231257 * Vp$	P < 0,01 (77,5)
150	$Cu = -0,0611051 + 0,0000371575 * Dur + 0,00366694 * VmPE$	P < 0,01 (80,7)
150	$Cu = -0,0159245 + 0,0000379621 * Dur + 0,00122432 * VMaPE$	P < 0,01 (78,1)

En el Anexo 6, Tabla A, se hallan las regresiones múltiples halladas entre los mismos parámetros climáticos y los suelos Tc, LF+VM o Ls+Ar. Las correlaciones halladas cuando se

utilizaron en forma conjunta las concentraciones de elementos en los materiales erosionados de LF y VM, se deben probablemente a que ambos poseen similar granulometría, ya que ha sido demostrada, por ejemplo, la relación entre la textura y la concentración de C y N en el material erosionado (Wang *et al.*, 2016).

En el Anexo 6, Tabla B se hallan las regresiones simples con los mismos parámetros climáticos ya mencionados. Las concentraciones de C, N, Ca, Mg, Fe, Mn y Cu del material erosionado en todos los sitios, se relacionaron linealmente con la duración de las tormentas.

A modo de ejemplo, la concentración de C de todos los sitios se relacionó linealmente con la duración de la tormenta (Figura 3.36). A medida que aumentó la duración del evento erosivo, el material tuvo concentraciones más altas de C. Las rectas presentaron pendientes semejantes por lo cual un aumento en la duración de la tormenta, produciría incrementos similares de concentración de C a diferentes alturas.

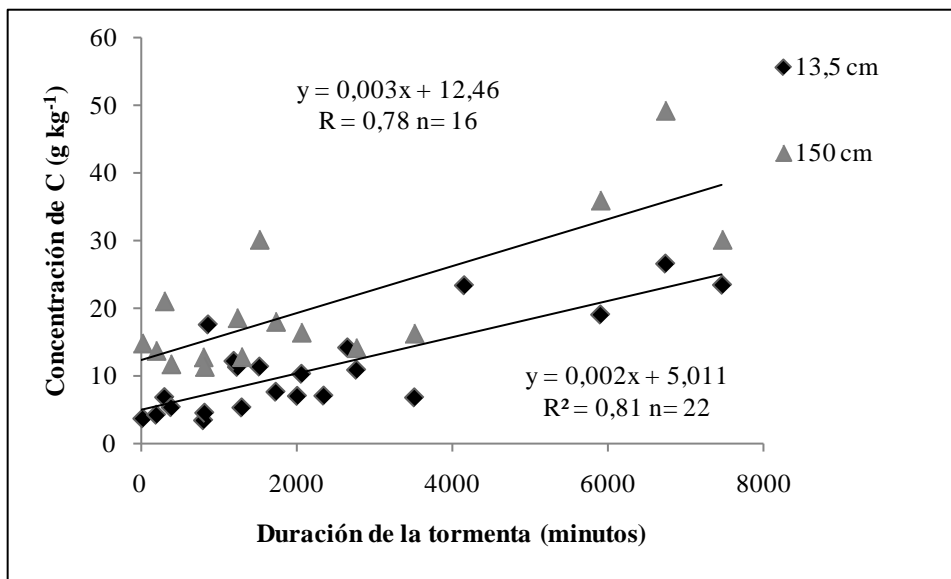


Figura 3.36. Relación entre concentración de C y duración de las tormentas, a los 13,5y 150 cm de altura para todos los sitios.

La concentración de K en el material erosionado en tanto, disminuyó a medida que aumentó la duración de la tormenta. ($p < 0,05$). Probablemente porque el K estaría formando

parte de agregados de menor tamaño ($< 50 \mu\text{m}$) que serían los primeros en ser transportados con una tormenta de corta duración.

También se encontraron regresiones lineales simples entre concentración de elementos (C, N, P, Ca, Mg, K, Fe, Mn, Cu y Zn) y velocidad, pero en este caso sólo cuando los sitios se agruparon de acuerdo a su génesis (Anexo 6, Tabla B). En general las concentraciones de los elementos aumentaron al incrementarse la velocidad. Sólo se hallaron relaciones lineales negativas entre la concentración de Ca y Mg a los 13,5 cm de altura y velocidad, para los sitios LF+VM, ello probablemente debido a que un aumento en la velocidad del viento provocaría el transporte de partículas de menor tamaño o agregados de mayor tamaño y menos densos, que en ambos casos estarían menos enriquecidos en Ca (Aimar, 2002).

Con estos resultados se estaría validando parcialmente la **H7**. *Mayores velocidades y duraciones de las tormentas de viento incrementan la cantidad de suelo erosionado y la concentración de elementos en el material erosionado*, dado que para la mayoría de los elementos, el material erosionado tuvo concentraciones más altas con el aumento de la duración de la tormenta y la velocidad del viento, a las distintas alturas consideradas. Iguales tendencias fueron halladas al analizar sólo la duración de las tormentas. La concentración de Ca, K y Mg, presentó relaciones negativas y en el caso del S no se halló ninguna relación entre su concentración en el material transportado y los parámetros climáticos. No obstante, a pesar del importante número de correlaciones halladas, estas tendencias deberán ser probadas con condiciones controladas de velocidad y duración. Este estudio se efectuó en condiciones de campo y con diferentes condiciones de muestreo. Por ejemplo, en los sitios de LF, VM, AP, PA o SR la recolección del material se efectuaba al finalizar el evento erosivo. En PC y RM los muestreos correspondieron a períodos que, en algunos casos, incluyeron más de una tormenta. Una evaluación de suelos genéticamente diferentes en túnel de viento, permitiría comparar la calidad del material a iguales condiciones de velocidades de viento y duración del proceso erosivo.

CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos se pudo concluir que:

- Los suelos desarrollados sobre de loess fueron los que más se erosionaron (entre 25 y 27 Mg ha⁻¹.año⁻¹) ya que se mantuvieron sin cobertura y sin rugosidad durante el período de muestreo. Las menores pérdidas se produjeron en los suelos terciarios, principalmente en un sitio de Patagonia (Potrok Aike), donde la erosión no superó los 10 kg ha⁻¹ en la mayoría de los eventos erosivos. Estos resultados permitieron rechazar la hipótesis que planteaba que la erosión poseería mayor magnitud en suelos desarrollados sobre arenas eólicas y materiales terciarios. Las bajas erosiones en los suelos terciarios se deberían a la cobertura con vegetación natural y material detrítico sobre la superficie del suelo, aun cuando estos suelos se encuentren en las regiones de más alta erosividad climática. La existencia de cobertura habría generado el entrapamiento de partículas que se movilizaron por saltación, por lo cual en los suelos terciarios hubo una mayor proporción de partículas que se trasladaron por suspensión en relación a los suelos loésicos y arenoso.
- El transporte horizontal de material se realizó a mayor distancia en suelos de texturas más finas, por ser más fácilmente transportables por el viento. De esa manera, los materiales de uno de los suelos loésicos (de granulometría más fina) recorrieron más distancia, los restantes suelos loésicos y los suelos arenosos tuvieron un desplazamiento intermedio y menor los sedimentos terciarios.
- La mayor cantidad de material erosionado se transportó cerca de la superficie en todos los suelos estudiados, aunque, proporcionalmente, ésta cantidad fue menor en los suelos terciarios que en los loésicos o arenosos. La presencia de cobertura vegetal en los suelos de sedimentos terciarios pudo haber incidido en estas tendencias.

- La arena fina (100 a 250 μm de diámetro) fue la fracción granulométrica predominante en el material transportado a baja altura (13,5 cm). A las alturas más elevadas predominaron los limos en los suelos loéssicos y las arenas finas en los suelos arenosos y terciarios.

- El material transportado fue, en todos los casos, de granulometrías más finas que el suelo original. El material erosionado estuvo enriquecido en partículas de 2 a 74 μm para un suelo loéssico (Santa Rosa), de 2 a 100 μm para los restantes suelos loéssicos y arenoso y de 2 a 250 μm para los suelos terciarios.

- Los suelos loéssicos presentaron mayor capacidad para emitir material particulado (PM_{10}) debido a la mayor movilización de limo a mayores alturas que ocurre en estos suelos. Estas emisiones fueron afectadas positivamente por los contenidos de limo y negativamente por los de materia orgánica.

- Los materiales erosionados de todos los suelos estuvieron enriquecidos en la mayoría de los elementos, incrementándose esta tendencia en sedimentos transportados a mayor altura. La concentración de la mayoría de los elementos (C, N, Mg, Fe, Mn, Ca, Cu y Zn) en el material erosionado de los suelos terciarios, fue más elevada que en los loéssicos y arenosos. Solo K y S tuvieron mayores concentraciones en el material proveniente de los suelos loéssicos. Las concentraciones de P, en tanto, fueron similares en los materiales erosionados de todos los suelos estudiados.

- Las concentraciones de C y N de los materiales erosionados variaron en forma semejante. Lo mismo sucedió, por un lado, con Fe y Mn, y por otro con Cu y Zn. Esto obedecería a que los elementos se acumulan en similares fracciones granulométricas.

- Las pérdidas absolutas de elementos se ordenaron en la secuencia: suelos loéssicos > arenoso > terciarios, en coincidencia con las mayores magnitudes de la erosión que se detectaron en ese mismo orden.

- Los suelos desarrollados sobre loess, a pesar de producir materiales erosionados con menores concentraciones en elementos que los terciarios, presentan, potencialmente, mayores tendencias a perder cantidades absolutas más elevadas de esas sustancias, debido a sus mayores tasas de erosión. Esto implicaría efectos más negativos tanto sobre la calidad de los suelos erosionados como sobre el ecosistema, particularmente a través de la mayor emisión PM_{10} a la atmósfera.

Futuras líneas de investigación

- De acuerdo a una de las hipótesis planteadas, se esperaba que el material erosionado de los suelos desarrollados sobre sedimentos terciarios tuvieran menores concentraciones de C y N y mayores de K, en relación a los suelos loésicos. Sin embargo los resultados de este estudio demostraron lo contrario. Por ello sería importante analizar las tendencias que presentan distintos elementos para acumularse en fracciones (orgánicas e inorgánicas, de diferente tamaño, entre otros) y determinar cuáles de los elementos se transportan principalmente por flujo horizontal o flujo vertical.

- Se ha comprobado que la granulometría del suelo influye sobre la distancia a la cual puede ser transportado el material erosionado y su textura, mediante estudios de túnel de viento. No se ha analizado, mediante mediciones de campo, como es esta distribución en distancias mayores, bajo condiciones variables de dirección, duración y velocidad del viento, cobertura vegetal, relieve, etc. Tampoco se analizó como varía la composición del material erosionado, principalmente en cuanto a su composición elemental. Por esa razón, futuras investigaciones deberían evaluar la concentración de los elementos en el material transportado, teniendo en cuenta distancias variables desde la fuente, en distintos ambientes.

- Un elemento que debería ser analizado con más detalle es el Zn, elemento que, en este estudio, podría haber sufrido cierta contaminación por el uso de colectores BSNE

confeccionados con este metal. Para este tipo de estudios debería analizarse la composición del material erosionado utilizando colectores fabricados con otro material, por ejemplo los de tipo Wilson and Cook Modificados (MWAC) que están contruidos de material plástico y vidrio.

- Se hallaron relaciones lineales simples y múltiples entre la concentración de elementos y parámetros climáticos. Sin embargo, este análisis se efectuó en condiciones de campo y con diferente rigurosidad de muestreo, dependiendo de la factibilidad de acceso a los sitios. En algunos de ellos, los muestreos correspondieron a tormentas individuales y en otros, a un período de tiempo que incluyó más de una tormenta. Por ello, sería conveniente validar estas relaciones mediante estudios de túnel de viento, bajo condiciones controladas de velocidad de viento y duración del evento.

- En los materiales erosionados en suelos desarrollados sobre materiales terciarios, se hallaron elevadas concentraciones en C y N, aparentemente producto del aporte de C desde la cobertura vegetal. A fin de comprobar el efecto destructivo del viento sobre la vegetación y el posible aporte de C y N al material erosionado desde este origen, deberían llevarse a cabo estudios acerca del efecto abrasivo del viento sobre el estrato herbáceo y arbustivo de estas regiones.

- Se comprobó que el material erosionado está enriquecido en la mayoría de los elementos analizados y en mayor medida, el transportado a mayor altura. Este tipo de material, que eventualmente puede ser la fuente de emisión de PM_{10} , contiene componentes que, potencialmente, poseen un alto impacto ambiental, como distintos tipos de contaminantes y agroquímicos. Existen muy pocos estudios al respecto, futuras investigaciones deberían analizar la calidad del material particulado, específicamente en la región de los suelos loésicos, que tienen alta potencialidad de emitir PM_{10} y son sometidos a manejos agrícolas que incluyen el uso de pesticidas, en general.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aimar S. B. 2002. Estimaciones cualitativas y cuantitativas de pérdidas por erosión eólica en suelos de la Región Semiárida Pampeana central. Tesis de Magíster en Agronomía. Universidad Nacional del Sur. 143 pp.
- Aimar S. B., Buschiazzo D. E. y Peinemann N. 2003. Erosión eólica. Cuantificación de material erosionado. En: Viento, Suelo y Planta. Golberg y Kin, Eds. INTA. 35-44.
- Aimar S. B., Rojas J., Guevara G. and Buschiazzo D. E. 2010. Nutrient losses by wind erosion in an Entic Haplustoll on Chaco, Argentina. VII International Conference on Aeolian Research 106.
- Aimar S. B., Mendez M. J. y Buschiazzo D. E. 2011. Predicción de la erosión eólica potencial con el modelo EWEQ en dos suelos loésicos: efecto de las condiciones climáticas. *Ciencia del suelo* 29 (2): 253-264.
- Alfaro S. C., Rajot J. L. and Nickling W. 2004. Estimation of PM₂₀ emissions by wind erosion: main sources of uncertainties. *Geomorphology* 59: 63-74.
- Alfaro S. C. 2008. Influence of soil texture on the binding energies of fine mineral dust particles potentially released by wind erosion. *Geomorphology* 93: 157-167.
- Arens S. M., Van Boxel J. H. and Abuodha J. O. Z. 2002. Changes in grain size of sand in transport over a foredune. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 1163-1175.
- Armbrust D. V. 1984. Wind and Sandblast Injury to Field Crops: Effect of Plant Age. *Agronomy Journal* 76 (6): 991-993.
- Avila A., Queralt Mitjans I. and Alarcon M. 1997. Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 102 (D18): 21977-21996.
- Bagnold R.A. 1941. The physics of blown sand and desert dunes. Methuen, London. 265 pp.
- Barthès B. G., Bruneta D., Hienb E., Enjalricc F., Conchea S., Frescheta G. T., d'Annunzioid R. and Toucet-Louria J. 2008. Determining the distributions of soil carbon and nitrogen in particle size fractions using near-infrared reflectance spectrum of bulk soil samples. *Soil Biology & Biochemistry* 40: 1533-1537.
- Beare M. H., Hu S., Coleman D. C. and Hendrix P. F. 1997. Influences of mycelial fungus on soil aggregation and organic matter storage in conventional and no-tillage soils. *Appl. Soil Ecol.* 5: 211-219.
- Belnap J., Reynolds R. L., Reheis M.C., Phillips S. L., Urban F. E. and Goldstein H. L. 2009. Sediment losses and gains across a gradient of livestock grazing and plant invasion in a cool, semi-arid grassland, Colorado Plateau, USA. *Aeolian Research* 1 (1-2): 27-43.
- Biolders C. L., Rajot J. L. and Amadou M. 2002. Transport of soil and nutrients by wind in bushfallow land and traditionally managed cultivated fields in the Sahel. *Geoderma* 109: 19-39.

- Bisal F. and Hsieh J. 1966. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Science* 102: 143-146.
- Buschiazzo D. E. y Taylor V. 1993. Efectos de la erosión eólica sobre algunas propiedades de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central. *Ciencia del Suelo* 10/11: 46-53.
- Buschiazzo D. E., Aimar S. B. y Stahr K. 1995. Factores que afectan la estabilidad estructural de suelos en la Región Semiárida Pampeana Central (Argentina). *Ciencia del Suelo* 13 (2): 66-69.
- Buschiazzo D. E., Hevia G. G., Urioste A. M. and Hepper E. N. 2000. Cultivation effects on phosphate forms and sorption in loess-soils of Argentina. *Soil Science* 165 (5): 427-436.
- Buschiazzo D. E. y Aimar S. B. 2003. Erosión eólica: Procesos y Predicción. En: *Viento, Suelo y Planta*. Golberg y Kin, Eds. INTA. 21-34.
- Buschiazzo D. E. 2006. Management systems in southern South America. In: Peterson GA, Unger PW, Payne WA (Eds.) *Dryland Agriculture*, 2nd Ed., Monograph 23. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI. Pp 395-426.
- Buschiazzo D. E., Zobeck T. M. and Abascal S. A. 2007. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. *J. Arid. Env.* 69: 29-39.
- Buschiazzo D. E., Panebianco J. E., Guevara G., Rojas J., Zurita J. J., Bran D., López D., Gaitán J. y Hurtado P. 2009. Incidencia potencial de la erosión eólica sobre la degradación del suelo y la calidad del aire en distintas regiones de la Argentina. *Ciencia del suelo* 27(2): 255-260.
- Buschiazzo D. E. 2014. Génesis de las toscas de suelos pampeanos. En: *Acumulaciones Calcáreas de Suelos Pampeanos*. Ed. Imbellone, P. A. y Panigatti J. L. AASC e INTA.
- Buschiazzo D. E. and Funk R. 2015. Wind erosion of agricultural soils and the carbon cycle. In: *Soil Carbon science, management and policy for multiple benefits*. Ed. Banwart S. A., Noellemeyer E. and Milne E. Chapter 13: 161-168.
- Cabrera, A. L. 1957. La vegetación de la Puna Argentina. *Revista de Investigaciones Agrícolas* 11(4): 317-512.
- Calvo C., Alves C., Castro A., Pont V., Vicente A. M. and Fraile R. 2013. Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues. *Atmospheric Research* 120–121: 1–28.
- Carvacho O. F., Ashbaugh L. L., Brown M. S. and Flocchini R. G. 2004. Measurement of PM_{2.5} emission potential from soil using the UC Davis resuspension test chamber. *Geomorphology* 59: 75–80.
- Cattle S. R., McTainsh G. H. and Wagner S. 2002. Aeolian dust contributions to soil of the Namoi Valley, northern NSW, Australia. *Catena* 47 (3): 245-264.
- Cercasov V. and Wulfmeyer V. 2008. Trends in airborne particulates in Stuttgart, Germany: 1972-2005. *Environmental Pollution* 152(2):304-313.
- Chapell A., Warren A., Taylor N. and Charlton M. 1998. Soil flux (loss and gain) in southwestern Niger and its agricultural impact. *Land Degradation Dev.* 9: 295-310.

- Charron A. and Harrison R. M. 2003. Primary Particle Formation from Vehicle Emissions during Exhaust Dilution in the Roadside Atmosphere. *Atmos. Environ.* 37: 4109–4119.
- Chen W., Fryrear D. W. and Gillette D. A. 1998. Sedimentary characteristics of drifting sediments above an eroding loessal sandy loam soil as affected by mechanical disturbance. *Journal of Arid Environments* 36: 421-440.
- Chen W., Fryrear D. W. 1996. Grain-size distributions of wind eroded material above a flat bare soil. *Phys. Geogr.* 17: 554–584.
- Chepil W. S. 1945. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Sci.* 60: 305-332.
- Chepil W. S. 1957. Width of field strips to control erosion. *Kansas Agr. Expt. Sta. Techn. Bull.* 92 pp.
- Chepil W. S. 1958a. Sedimentary characteristics of dust storms: I. Sorting of wind-eroded soil material. *Am. Journal of Sci.* 255: 12-22.
- Chepil W. S. 1958b. Soil conditions that influence wind erosion. *USDA. Techn. Bull. N° 1185*, 28 pp.
- Chepil W. S. 1960. Conversion of relative field erodibility to annual soil losses by wind. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24: 143-145.
- Chepil W. S. 1961. The use of spheres to measure lift and drag on wind-eroded soil grains. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 25: 243-245.
- Chepil W. S. and Woodruff N. P. 1961. The physics of wind erosion and its control. *Adv. Agronomy* 15: 211-302.
- Clausnitzer H. and Singer M.J., 1996. Respirable-dust productions from agricultural operations in the Sacramento Valley, California. *Journal of Environmental Quality* 25: 877-884.
- Colazo J. C and Buschiazzo D. E. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma* 159 (1): 228-236.
- Cooke R., Warren A. and Goudir A. 1993. *Desert geomorphology*. UCL Press. St. Ives. UK.
- Cornelis W. M. and Gabriels D. 2003. The effects of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: an evaluation of selected models. *Sedimentology* 50: 771-790.
- Deangelis M. and Gaudichet A. 1991. Saharan dust deposition over Mont-Blanc (French Alps) during the last 30 years. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 43 (1): 61-75.
- Dong, Z. and Chen, G. 1997. A preliminary insight into the Wind Erosion problem in Houshan Area of Inner Mongolia. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation* 3: 156–174.
- Del Valle H., Bouza P., Rial P. y González L. 2002. Del Relatorio del XV Congreso Geológico Argentino. Tema Suelos Pp 815-828.
- Devine S., Markewitz D., Hendrix P. and Coleman D. 2014. Soil Aggregates and Associated Organic Matter under Conventional Tillage, No-Tillage, and Forest Succession after Three Decades. Published on line: journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0084988.

- Di Rienzo J. A., Balzarini M., Casanoves F., González L., Tablada M. y Robledo C. W. 2002. Infostat/Profesional version 1.1.
- Doetterl S., Six J., Van Wesemael B. and Van Oost K. 2012. Carbon cycling in eroding landscapes: geomorphic controls on soil organic C pool composition and C stabilization. *Global Change Biology*. 18: 2218-2232.
- de Oro L. A. and Buschiazzo D. E. 2008. Threshold wind velocity as an index of soil susceptibility to wind erosion under variable climatic conditions. *Land Degradation & Development* 20: 14-21.
- Dong Z., Liu X., Wang H., Zhao A. and Wang X. 2003. The flux profile of a blowing sand cloud: a wind tunnel investigation. *Geomorphology* 49: 219-230.
- Dong Z. and Qian G. 2007. Characterizing the height profile of the flux of wind-eroded sediment. *Environmental Geology* 51: 835-845.
- Elliott E. T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal* 50: 627-633.
- Engelstaedter S., Tegen I. and Washington R. 2006. North African dust emissions and transport. *Earth Science Reviews* 79: 73-100.
- Farrell E., Sherman D., Ellis J. T. and Li B. 2012. Vertical distribution of grain size for wind blown sand. *Aeolian Research* 7: 51-61.
- Fécan F., Marticorena B. and Bergametti G. 1999. Parametization of the increase of the aeolian threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semiarid areas. *Ann. Geophys.* 17: 149-157.
- Fernandez, R. y Paruelo, J. 1993. Estepa arbustivo-graminosas de *Stipa* sp del centro-oeste del Chubut. En: *Secuencia de deterioro en distintos ambientes patagónicos. Su caracterización mediante el modelo de Estados y Transiciones*. Paruelo, J; M. Bertiller, T. Schlicher y F. Coronato Eds. Ludepa SME. Bariloche. 109 pp.
- Ferreira A. D. and Oliveira R. A. 2009. Wind erosion of sand placed inside a rectangular box. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 97: 1-10.
- Fidalgo F. y Rabassa J. 1984. Del Relatorio del IX Congreso Geológico Argentino. Capítulo I-II. Pp 301-316.
- Fiol L.A., Fornos J. J., Gelabert B. and Guijarro J. A. 2005. Dust rains in Mallorca (western Mediterranean): their occurrence and role in some recent geological processes. *Catena* 63 (1): 64-84.
- Frenguelli J. 1955. Loess y limos pampeanos. Ministerio de Educación de la Nación. Serie técnica y didáctica N° 7. La Plata. 88 Pp.
- Fryrear D. W. 1986. A field dust sampler. *Journal Soil Water Conservation* 41:117-120.
- Fryrear D. W. 1987. Aerosol measurements from 31 dust storms. *Particulate and Multiphase Processes* 2: 117-120.
- Fryrear D. W. 1990. Wind erosion: mechanics, prediction, and control. *Adv. In Soil Science* 13: 187-199.
- Fryrear D. W. and Saleh A. 1993. Field wind erosion: Vertical distribution. *Soil Science* 154: 294-320.
- Fryrear D. W. 1995. Soil losses by wind erosion. *Soil Science Soc. Am. J.* 59: 668-672.
- Fryrear D. W., Krammes C. A., Williamson C. M. and Zobeck T. M. 1994. Computing the wind erodible fraction of soils. *J. Soil & W. Cons.* 49: 183-188.

- Füchtbauer H. and Müller G. 1977. Sediment Petrologie. Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine. E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller). 784 pp.
- Füllen M. A. 1985. Wind erosion of arable soils in east Shropshire (England) during spring 1983. *Catena* 12: 111-120.
- Füllen M. A. and Mitchell D. 1991. Taming the Shamo Dragon. *Geographical Magazine* 26-29.
- Funk R. 1995. Quantifizierung der Wind erosion auf einem Sandstandort unter besonderer Berücksichtigung der Vegetationswirkung. ZALF Müncheberg Bericht 16.
- Funk R., Skidmore E.L. and Hagen L.J. 2004. Comparison of wind erosion measurements in Germany with simulated soil losses by WEPS. *Environmental Modelling & Software* 19: 177-183.
- Funk R., Reuter H. I., Hoffmann C., Engel W. and Öttl, D. 2008. Effect of moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils. *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (12): 1851-1863.
- Gabel, D. 1993. Einfluss vulkanischer Asche und Nutzung auf die Böden der semiariden Pampa Argentiniens. Diplomarbeit von D. Gabel Allgemeine Agrarwissenschaften. Universität Hohenheim. Stuttgart. Pp. 99.
- Gaiero D., Frederic Brunet M., Probst J. L. and Depetris P. 2007. A uniform isotopic and chemical signature of dust exported from Patagonia: Rock sources and occurrence in southern environments. *Chemical Geology* 238: 107-120.
- Geiger R. 1957. *The Climate Near the Ground*. 2nd rev. Harvard Univ. Press, Cambridge, Massachusetts.
- Gile L. H. and Grossman R. B. 1979. *The Desert Project soil monograph: Soils and landscapes of a desert region astride the Rio Grande Valley near Las Cruces, New Mexico*. Lincoln, NE: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Gill T. E., Zobeck T. M., Stout J. E. and Gregory J. M. 1999. Laboratory generation and measurement of fugitive dust. In: *Proceedings of the Wind Erosion International Symposium Workshop, Manhattan, KS, USDA Technical Publication Series 9*.
- Gill T. E., Zobeck T. M., Stout J. E. 2006. Technologies for laboratory generation of dust from geological materials. *Journal of Hazardous Materials* 132: 1-13.
- Gillette D. A. 1977. Fine particulate emissions due to wind erosion. *Trans Am. Soc. Agric. Eng.* 20: 890-897.
- Gillette D. A. and Walker T. R. 1977. Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, High Plains of west Texas. *Soil Science* 123: 97-110.
- Godlinski F., Hao X., Chang C. and Lindemann J. 2008. Nutrient supply to soil and surface water from deposition of wind-erodible-sized aggregates. *Soil Science* 173: 214-222.
- Gómez-Moreno F. J., Pujadas M., Plaza J., Rodríguez-Maroto J. J., Martínez-Lozano, P. and Artúñano B. 2011. Influence of seasonal factors on the atmospheric particle number concentration and size distribution in Madrid, *Atmos. Environmental* 45: 3199-3180.

- Goudie A. S. and Middleton N. J. 2001. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-Science Reviews* 56 (1-4): 179-204.
- Greeley R., Blumberg, D. G., Williams, S. H. 1996. Field measurements of the flux and speed on wind-blown sand. *Sedimentology* 43: 41-52.
- Grini A. and Zender C. S. 2004. Roles of saltation, sandblasting, and wind speed variability on mineral dust aerosol size distribution during the Puerto Rican dust experiment (PRIDE). *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 109 (D7).
- Hagen L. J. 1984. Soil aggregate abrasion by impacting sand and soil particles. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.* 27: 805-808.
- Hagen L. J., and Lyles L. 1985. Amount and nutrient content of particles produced by soil aggregate abrasion. Paper ASAE 85: 12 pp.
- Harrison K. 2000. Role of increased marine silica input on paleo-pCO₂. *Paleoceanography* 15 (3): 292-298.
- Herrmann, L. 1996. Staubdeposition auf Böden West-Afrikas. *Hohenheimer Bodenkundliche Hefte*. Universität Hohenheim. Stuttgart. Deutschland. Pp. 239.
- Hoffmann C., Funk R., Li Y. and Sommer M. 2008. Effects of grazing on wind driven carbon and nitrogen ratios in the grasslands of Inner Mongolia, China. *Catena* 75: 182-190.
- Hoffmann C., Funk R., Reiche M. and Li Y. 2011. Assessment of extreme wind erosion and its impacts in Inner Mongolia, China. *Aeolian Research* 3: 343-351.
- Horikawa K., Hotta S., Kubota S. and Katori S. 1983. On the sand transport rate by wind on beach, *Coastal Eng. in Japan* 26: 100-120.
- Huszar P. C. and Piper S. L. 1986. Estimating the off-site costs of wind erosion in New Mexico. *Journal of Soil and Water Conservation* 41 (6): 414-416.
- INTA, Gobierno de La Pampa y Universidad Nacional de La Pampa. 1980. *Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa*. 493 pp.
- Iriondo M. H. 1997. Models of Deposition of Loess and Loessoids in the Upper Quaternary of South America. *Journal of South American Earth Science* 10 (1): 71-79.
- Iturri L. A. and Buschiazzo D. E. 2014. Cation exchange capacity and mineralogy of loess soils with different amounts of volcanic ashes. *Catena* 121:81-87.
- Iversen J. D., Pollack J. B., Greenley R. and White B. R. 1976. Saltation threshold on Mars: the effect of interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density. *Icarus*. 29: 319-393.
- Iwai K., Mizuno S., Miyasaka Y. and Mori T. 2005. Correlation between suspended particles in the environmental air and causes of disease among inhabitants: Cross-sectional studies using the vital statistics and air pollution data in Japan. *Environmental Res.* 99: 106-117.
- Karaca F., Anil I. and Alagha O. 2009. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM₁₀ profile of a megacity. *Atmospheric Environment* 29: 437-450.
- Koren I., Kaufman Y. J., Washington R., Todd M. C., Rudich Y., Vanderlei Martins J. and Rosenfeld D. 2006. The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that

- provides most of the mineral dust to the Amazon forest. *Environ. Res. Lett.* 1: 014005 (5pp).
- Kröhling D. 1999. Sedimentological maps of the typical loessic units in North Pampa, Argentina. *Quaternary International* 62: 49-55.
- Kufmann C. 2006. Measurement and climatic control of eolian sedimentation on snow cover surface in the northern Calcareous Alps (Wetterstein-Karwendel and Berchtesgadener Alps, Germany). *Zeitschrift Für Geomorphologie* 50 (2): 245-268.
- Kumar A., Sudheer A. K. and Sarin M. M. 2008. Chemical characteristics of aerosols in MABL of Bay of Bengal and Arabian Sea during spring inter-monsoon: a comparative study. *Journal Earth Syst. Science* 117(S1): 325–332.
- Lal R. 1991. Soil structure and sustainability. *Journal of Sustainable Agriculture*. Vol. 1(4): 67-92.
- Lal, R. 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 29 (4): 437-450.
- Laprade K. E. 1957. Dust-storm sediments of Lubbock Area, Texas. *Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol.* 41:709-726.
- Larney F. J.; Bullock, M. S., Janzen, H. H., Ellert B. H. and Olson C. S. 1998. Wind erosion effect on nutrient redistribution and soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation* 53: 133-140.
- Lawrence C.R. and Neff J.C. 2009. The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition, *Chemical Geology* 267: 46-63.
- Ledesma L. L. y Zurita J. J. 1990. En: Atlas de Suelos de la República Argentina. Provincia de Chaco. Editores: Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca; INTA. Pp. 250-331.
- Lenes J. M., Prospero J. M., Landing W. M., Virmani J. I. and Walsh J. J. 2012. A model of Saharan dust deposition to the eastern Gulf of Mexico. *Marine Chemistry* 134-135: 1-9.
- Li F., Zhao L. and Zhang H. 2004. Wind erosion and airborne dust deposition in farmland during spring in the Horqin Sandy Land of eastern Inner Mongolia, China. *Tillage Research*. 75 (2): 121-130.
- Li N., Gu W., Dub Z., Lic Z. and Song P. 2006. Observation on soil water content and wind speed in Erlianhot, a dust-source area in northern China. *Atmospheric Environment* 40: 5298-5303.
- Li Z. S., Feng D. J., Wu, S. L., Borthwick, A. G. L. and Ni J. R. 2008a. Grain size and transport characteristics of non-uniform sand in Aeolian saltation. *Geomorphology* 100: 484-493.
- Li J., Okin G. S., Alvarez L. and Epstein H. 2008b. Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. *Biogeochemistry* 88 (1): 73–88.
- Li J., Okin G. S., Alvarez L. and Epstein H. 2009a. Sediment deposition and soil nutrient heterogeneity in two desert grassland ecosystems, southern New Mexico. *Plant Soil* 19: 67-84.

- Li J., Okin G. S. and Epstein H.E. 2009b. Effects of enhanced wind erosion on surface soil texture and characteristics of windblown sediments. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. doi:10.1029/2008JG000903.
- Lingard J. J. N., Tomlin A. S., Clarke A. G., Healey K., Hay A. and Wild C.P. 2005. A study of trace metal concentration of urban airborne particulate matter and its role in free radical activity as measured by plasmid strand break assay. *Atmospheric Environment* 39: 2377-2384.
- Littmann T. 1997. Atmospheric input of dust and nitrogen into the Nizzana sand dune ecosystem, north-western Negev, Israel. *Journal of Arid Environments* 36: 433-457.
- Lui L. Y., Li X. Y., Ahi P. J., Gao, S. Y., Wang J. H., Ta W. Q., Song Y., Liu M. X., Wang Z. and Xiao B. L. 2007. Wind erodibility of major soils in the farming-pastoral ecotone of China. *Journal of arid environments* 68 (4): 611-623.
- López M. V., Gracia R. and Arrúe J. L. 2001. An evaluation of wind erosion hazard in fallow lands of semiarid Aragon (NE Spain). *Journal of Soil and Water Conservation* 56 (3): 212-219.
- López M. L., Ceppi S., Palancar G. G., Olcese L. E., Tirao G. and Toselli B. M. 2011. Elemental concentration and source identification of PM10 and PM2.5 by SR-XRF in Córdoba City, Argentina. *Atmospheric Environment* 45 (31): 5450-5457.
- López Cancio J., Vera Castellano A., Chaar Hernández M., García Bethencourt, R. and Macías Ortega E. 2008. *Journal of Hazardous Materials* 160: 521-518.
- Lores, R.; Ferreira, C. A.; de Anchorena J.; Lipinski V. y Marcolín A. A. 1983. Las unidades ecológicas del campo experimental Pilcaniyeu (Pcia. Río Negro) su importancia regional. *Gaceta Agronómica* Vol. 4(16): 661-690.
- Lyles L. 1975. Possible effects of wind erosion on soil productivity. *Journal of Soil and Water Conservation* 30 (6): 279-283.
- Lyles L. 1983. Erosive wind energy distributions and climatic factors for the west. *Journal of Soil and Water Conservation* 38: 106-109.
- Lyles L. and Tatarko J. 1986. Wind erosion effects on soil texture and organic matter. *Journal of Soil and Water Conservation* 41 (3): 191-193.
- Lyles L. 1988. Basic wind erosion processes. *Agric. Ecosystems Environmental*. 22/23: 91-101.
- Leys J. F. and McTainsh, G.H. 1996. Sediment fluxes and particle grain-size characteristics of wind-eroded sediments in southeastern Australia. *Earth Surf. Proc. Landf.* 21: 661-671.
- Madden N. M., Southard R. J. and Mitchell J. P. 2010. Soil water and particle size distribution influence laboratory-generated PM10. *Atmos. Environ.* 44: 745-752.
- Mahowald N. M., Artaxo P., Baker A. R., Jickells T. D., Okin G. S., Randerson J. T. and Townsend A. R. 2005. Impacts of biomass burning emissions and land use change on Amazonian atmospheric phosphorus cycling and deposition. *Global Biogeochemical Cycles* 19 (4).
- Marx S. K. and McGowan H. A. 2005. Dust transportation and deposition in a super humid environment, west coast, south island, New Zealand. *Catena* 59 (2): 147-171.

- Masri Z., Zobisch M., Bruggeman A., Hayek P. and Kardous, M. 2003. Wind erosion in a marginal Mediterranean dryland area: a case study from the Khanasservalley, Syria. *Earth Surf. Proc. Landf.* 28: 1211-1222.
- McTainsh G. H., Nickling W. G., Lynch A. W. 1997. Dust deposition and particle size in Mali, West Afrika. *Catena* 29: 307-322.
- McTainsh G. H. and Walker P. 1982. Nature and distribution of Hartmann dust. *Zeitschriftfür Geomorphologie* 26 (4): 417-435.
- Méndez M. J., de Oro L. A., Panebianco J. E., Colazzo J. C. and Buschiazzo D. E. 2006. Organic carbon and nitrogen in soils of semiarid Argentina. *Journal of Soil and Water Conservation* 61: 230-235.
- Méndez M. J., Panebianco J. E. and Buschiazzo D. E. 2013. A new dust generator for laboratory dust emission studies. *Aeolian Research* 8: 59-64.
- Meskhidze, N. 2007. Iron biogeochemistry in the southern ocean and the possible role of Patagonian Dust in ocean fertilization. *Multidisciplinary Workshop on Southern South American Dust*. Puerto Madryn, Argentina 3-5.
- Morrás H. J. M. 1995. Mineralogy and cation exchange capacity of the fine silt fraction in two soils from the southern Chaco Region (Argentina). *Geoderma* 64: 281-295.
- Moscatelli G. y Puentes I. 1996. Caracterización edáfica de la región. In: Buschiazzo, D. E., Panigatti, J. L., Babinec, y F. (Eds.), *Labranzas en la Región Semiárida Argentina*. INTA, Santa Rosa, Argentina 19-30.
- Nadir A. y Chafatinos T. 1999. Del Relatorio del XIV Congreso Geológico Argentino. Tema Suelos Pp 141-171.
- Neff J. C., Holland E. A., Dentener F. J., McDowell W. H. and Russell K. M. 2002. The origin, composition and rates of organic nitrogen deposition: a missing piece of the nitrogen cycle? *Biogeochemistry* 57 (1): 99-136.
- Nicholson S. 2000. Land surface processes and Sahel climate. *Reviews of Geophysics* 38, 117-139.
- Nishikawa M., Mori I., Morita M., Hao Q., Koyanagi H. and Haraguchi K. 2000. Characteristics of Sand Storm Dust Sampled at an Originating Desert. Case of the Taklamakan Desert. *Journal Aerosol Science* 31 (1): 755-756.
- O'Brien P. and McKenna Neuman C. 2012. A wind tunnel study of particles kinematics during crust rupture and erosion. *Geomorphology* 173-174 (1) 149-160.
- O'Hara S. L., Clarke M. L. and Elatrash M. S. 2006. Field measurements of desert dust deposition in Libya. *Atmospheric Environment* 40 (21): 3881-3897.
- Okin G. S. 2005. Dependence of wind erosion and dust emission on surface heterogeneity: stochastic modeling. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 110 (D11).
- Oliva G., González L., Rial P. y Livraghi E. 2001. En: *Ganadería ovina sustentable en la patagonia*. Centro Regional Patagonia Sur INTA. Estación experimental agropecuaria Santa Cruz. Pp 17-80.
- Peterson E. 2006. Management systems in southern South America. De Buschiazzo D. E. In: Peterson GA, Unger PW, Payne WA (Eds.) *Dryland Agriculture*, 2nd Ed., Monograph 23. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI. Pp 395-426.
- Pope C. A., Dockery D. W., Schwartz J. 1995. Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution. *Inhalation Toxicology* 7: 1-18.

- Pope C. A. and Dockery D. W. 1998. Epidemiology of particle effects. In: Lort, S. (Ed.), *Air Pollution and Health*. Academic Press, San Diego, CA, 673–705.
- Prospero J. M., Nees R. T. and Uematsu M. 1987. Deposition rate of particulate and dissolved aluminum derived from Saharan dust in precipitation at Miami, Florida. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 92 (D12): 14723-14731.
- Pye K. 1987. *Aerolian dust and dust deposits*. London, Academic Press. 333 pp.
- Qiang M., Chen F., Zhou A., Xiao S., Zhang J. and Wang Z. 2007. Impacts of wind velocity on sand and dust deposition during dust storm as inferred from a series of observations in the northeastern Qinghai–Tibetan Plateau, China. *Powder Technology* 175:82-89.
- Quiroga A. R., Buschiazzo D. E. 1988. Relaciones entre algunos parámetros de suelos de la Región Semiárida Pampeana Central. In *Actas del XII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo Ed. AACCS: Corrientes, Argentina, pp. 226.
- Ramsperger B., Peinemann N. and Stahr K. 1998a. Deposition rates and characteristics of aeolian dust in the semi-arid and sub-humid regions of the Argentinean Pampa. *Journal of Arid Environments* 39: 467-476.
- Ramsperger B., Herrmann L. and Stahr K. 1998b. Dust characteristics and source-sink relations in eastern West Africa (SW-Niger and Benin) and South America (Argentinean Pampas). *Z. Pflanzenernähr Bodenkunde*. 161: 357-363.
- Rashki A., Eriksson P. G., Rautenbach C. J. de W., Kaskaoutis D. G., Grote W. and Dykstra J. 2012. Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. *Chemosphere* 90 (2): 227-236.
- Ritchie J. C., McCarty G. W., Venteris E. R. and Kaspar T. C. 2007. Soil and soil organic carbon redistribution on the landscape. *Geomorphology* 89: 163-171.
- Saleh, A. y D. W. Fryrear. 1998. Soil roughness for the Revised Wind Erosion Equation, RWEQ. In: Fryrear DW, Saleh A, Bilbro JD, Schomberg HM, Stout JE, Zobeck TM. 1998. *Revised Wind Erosion Equation (RWEQ)*. Technical Bulletin 1, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory, Wind Erosion and Water Conserv. Res. Unit, USDA-ARS.
- Sankey J. B., Germino M. J., Benner S. G. Glenn N. F. and Hoover A. N. 2012. Transport of biologically important nutrients by wind in an eroding cold desert. *Aeolian Research* 7: 17-27.
- Santra P., Mertia R. S., Kumawat R. N., Sinha N. K. and Mahla H. R. 2013. Loss of soil carbon and nitrogen through wind erosion in the Indian Thar Desert. *Journal of Agricultural Physics* 13 (1): 13-21.
- Sharratt B. 2011. Size distribution of windblown sediment emitted from agricultural fields in the Columbia Plateau. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75:1054-1060.
- Saxton, K.; D. Chandler y W. Schillinger. 2001. Wind erosion and air quality in the Northwest U.S Columbia Plateau: Organization and progress. 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24-29, 1999. Purdue university and the USDA-ARS, National Soil Erosion Res. Laboratory. 766-770.

- Schlichting E., Blume H. P. and Stahr K. 1995. *Bodenkundliches Praktikum. Pareys Studententexte 81*. Blackwell Wissenschafts-Verlag. Berlin. 295pp.
- Schprentz D. 1996. *Breath-taking: premature mortality due to particulate air pollution in 239 American cities*. Natural Resources Defense Council, May.
- Schütz L. and Rahn K. A. 1982. Trace element concentrations in erodible soils. *Atmospheric Environment* 16 (1): 171-176.
- Schütz L. and Sebert M. 1987. Mineral aerosols and source identification. *Journal of Aerosol Science* 18 (1): 1-10.
- Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca; INTA. 1990. *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Tomos 1 y 2.
- Seinfeld J. H. and Pandis S. N. 1997. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley, New York, pp. 292–293.
- Shannak B., Corsmeier U., Kottmeier C. and Al-azab T. 2014. Wind tunnel study of twelve dust samples by large particle size. *Atmospheric Environment* 98: 442-453.
- Shao Y. and Raupach M. R. 1993. Effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 98 (D7): 12719-12726.
- Shao Y. and Leslie L. M. 1997. Wind erosion prediction over the Australian continent. *Journal of Geophysical Research* 102: 30091–30105.
- Shao Y. 2005. A Similarity Theory for Saltation and Application to Aeolian Mass Flux. *Bound.-Layer Met.* 115: 319-338.
- Shao Y., Wyrwoll K. H., Chappell A., Huang J., Lin Z., McTainsh G. H., Mikami M., Tanaka T. Y., Wang X. and Yoon S. 2011. Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research* 2 (4): 181-204.
- Silenzi J. C., Bravo O. A., Echeverría N. E. y Grossi T. 1993. Efectos de la erosión eólica sobre la productividad de un suelo. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mendoza. 329-330.
- Six J., Elliot E. T. and Paustian K. 2000. Soil macroaggregates turnover and microaggregates formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32: 2099-2103.
- Six J., Callewaert P., Lenders S., De Gryze S. and Morris S. J. 2002. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1981-1987.
- Skidmore E. L. and Layton J. B. 1992. Dry-soil aggregate stability as influenced by selected soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 557-561.
- Sterk G., Herrmann L. and Bationo A. 1996. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger. *Land Degradation and Development* 7 (4): 325-335.
- Sterk G., Parigiani J., Cittadini E., Peters P., Scholberg J. and Peri P. 2012. Aeolian sediment mass fluxes on a sandy soil in Central Patagonia. *Catena* 95: 112-123.
- Stout J. E. and Zobeck T. M. 1996. The Wolfforth field experiment: a wind erosion study. *Soil Science* 161: 616-632.

- Su Y.Z., Zhaoa H. L., Zhaoa W. Z. and Zhang T. H. 2004. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma* 122: 43-49.
- Suter-Burri K., Gromke C., Leonard K. C. and Graf F. 2013. Spatial patterns of aeolian sediment deposition in vegetation canopies: Observations from wind tunnel experiments using colored sand. *Aeolian Research* 8: 65-73.
- Szelagowski M., Zarate M. A. y Blasi A. 2004. Aspectos sedimentológicos de arenas eólicas del pleistoceno tardio-holoceno de la Provincia de La Pampa. *Asociación Argentina de Sedimentología* 11 (2): 69-83.
- Tan S.C., Shi G. Y. and Wang H. 2012. Long-range transport of spring dust storms in Inner Mongolia and impact on the China seas. *Atmospheric Environment* 46: 299- 308.
- Tan L., Zhang W., Qu J., Du J., Yin D. and An Z. 2014. Variation with height of aeolian mass flux density and grain size distribution over natural surface covered with coarse grains: A mobile wind tunnel study. *Aeolian Research* 15: 345-352.
- Tatarko J. 2001. Soil aggregation and wind erosion: processes and measurements. *Annals of Arid Z.* 40 (3): 251-263.
- Tegen I. and Fung I. 1995. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 100 (D9): 18707–18726.
- Tegen I., Werner M., Harrison S. P. and Kohfeld K.E. 2004. Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission. *Geophysical Research Letters* 31 (5).
- Terzi E., Argyropoulos G., Bougatioti A., Mihalopoulos N., Nikolaou K. and Samara C. 2010. Chemical composition and mass closure of ambient PM10 at urban sites. *Atmospheric Environment* 44: 2231-2239.
- Teruggi M. E. 1957. The nature and origin of Argentine loess. *Journal of Sedimentary Petrology* 27: 322-332.
- Thiombiano L., 2000. Étude de l'importance des facteurs édaphiques et pédopaysagiques dans le développement de la desertification en zone sahelienne du Burkina Faso. Doctoral Thesis, Cocody, Abidjan, Ivory Cost.
- Tisdall J. M., Oades J. M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal Soil Science* 33: 141-163.
- Trapp J. M., Millero F. J. and Prospero, J. M. 2010. Temporal variability of the elemental composition of African dust measured in trade wind aerosols at Barbados and Miami Marine Chemistry 120: 71–82.
- Uematsu M., Wang Z. F. and Uno I. 2003. Atmospheric input of mineral dust to the Western North Pacific region based on direct measurements and a regional chemical transport model. *Geophysical Research Letters* 30 (6): 1342.
- USDA–NRCS. 2007. National Resources Inventory 2007. http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1041379.pdf
- U.S. EPA. 1995. AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Washington, DC. Vol. I. 5thed: 1- 10. <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei10/fugdust/macdougall.pdf>,
- Van Curen R. A. and Cahill T.A. 2002. Asian aerosols in North America: frequency and

- concentration of fine dust. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 107 (D24).
- Van Pelt R. S. and Zobeck T. M. 2007. Chemical constituents of fugitive dust. *Environmental Monit. Assess.* 130: 3-16.
- Vargas Gil J. 1990. Provincia de Jujuy. En *Atlas de suelos de la República Argentina*. Pp 681-731.
- Vega E., Mugica V., Reyes E., Sánchez G., Chow J. C. and Watson J. 2001. Chemical composition of fugitive dust emitters in Mexico City. *Atmospheric Environment* 35: 4033-4039.
- Verheijen F. G. A., Jones R. J. A., Rickson R. J. and Smith C. J. 2009. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews* 94: 23-38.
- Visser S. M., Sterk G. and Karssenberg D. 2005. Wind erosion modelling in a Sahelian environment. *Environmental Modelling & Software* 20(1): 69-84.
- Visser S. M., Stroosnijder L. and Chardon W. J. 2005. Nutrient losses by wind and water, measurements and modeling. *Catena* 63: 1-22.
- Visser S. M. and Sterk G. 2007. Nutrient dynamics- wind and water erosion at the village scale in the Sahel. *Land Degradation & Development* 18(5): 578-588.
- Wake C. P., Mayewski P. A., Li Z., Han J. and Qin D. 1994. Modern eolian dust deposition in Central-Asia. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 46 (3): 220-233.
- Wang X., Oenema O., Hoogmoed W. B., Perdok U. D. and Cai D. 2006. Dust storm erosion and its impact on soil carbon and nitrogen losses in northern China. *Catena* 66: 221-227.
- Wang X., Lang L., Yan P., Wang G., Li H., Ma W. and Hua T. 2016. Aeolian processes and their effect on sandy desertification of the Qinghai-Tibet Plateau: A wind tunnel experiment. *Soil and Tillage Research* 158: 67-75.
- Webb N. P. and Strong C. L. 2011. Soil erodability dynamics and its representation for wind erosion and dust emission models. *Aeolian Research* 3: 165-179.
- Webb N. P., Chappell A., Strong, C., Marx, S. K. and McTainsh G. H. 2012. The significance of carbon-enriched dust for global carbon accounting. *Global Change Biology* 18: 3275-3278.
- Weinan C., Fryrear D. and Gillette D. 1998. Sedimentary characteristics of drifting sediments above an eroding loessal sandy loam soil as affected by mechanical disturbance. *Journal of Arid Environments* 39: 421-440.
- Williams M. A. J. and Balling R. C. 1996. *Interactions of desertification and climate*. Published for the World Meteorological Organization and the United Nations Environment Program. London: Arnold.
- Xuan J. and Sokolik, I. N. 2002. Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China. *Atmospheric Environment* 36: 4863-4876.
- Yan, P., Dong, Z.B., Dong, G.R., Zhang, X.B., Zhang, Y.Y., 2001. Preliminary results of using Cs-137 to study wind erosion in the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Arid Environments* 47: 443-452.
- Zárate, M. A. 2002. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews* 22: 1987-2006.

- Zárate M. A. and Tripaldi A. 2012. The aeolian system of central Argentina *Aeolian Research* 3 (4): 401-417.
- Zdanowicz C. M., Zielinski G. A. and Wake C.P. 1998. Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the Penny Ice Cap, Baffin Island, Arctic Canada. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 50 (5): 506-520.
- Zenchelsky S. T., Delany A. C. and Pickett R. A. 1976. The organic component of wind blown soil aerosol as a function of wind velocity. *Soil Science* 122: 129-179.
- Zhang X. Y., Arimoto R., Zhu G. H., Chen T. and Zhang G.Y. 1998. Concentration, size distribution and deposition of mineral aerosol over Chinese desert regions. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology* 50 (4): 317-330.
- Zhang Z., Wieland R., Reiche M., Funk R., Hoffmann C., Li Y. and Sommer M. 2011. Wind modelling for wind erosion research by open source computational fluid dynamics. *Ecological Informatics*. 6(5): 316-324.
- Zhao H.L., Yi X. Y., Zhou R. L., Zhao X. Y., Zhang T. H. and Drake S. 2005. Wind erosion and sand accumulation effects on soil properties in Horqin Sandy Farmland, Inner Mongolia. *Catena* 65: 71-79.
- Zhao, H.L., Zhou, R.L., Zhang, T.H., Zhao, X.Y., 2006. Effects of desertification on soil and crop growth properties in Horqin sandy cropland of Inner Mongolia, north China. *Soil and Tillage Research* 87, 175–185.
- Zhou R., Li Y., Zhao H. and Drake S. 2008. Desertification effects on C and N content of sandy soils under grassland in Horqin, Northern China. *Geoderma* 145: 370-375.
- Zingg A. W. 1953. Wind tunnel studies of the movement of sedimentary material. *Proc. 5th Hydraulic Conf. Bull.* 34:111-135.
- Zobeck T. M. and Fryrear D. W. 1986a. Chemical and physical characteristics of windblown sediment I. Quantities and physical characteristics. *Trans. ASAE* 29:1032-1036.
- Zobeck T. M. and Fryrear D. W. 1986b. Chemical and physical characteristics of windblown sediment II. Chemical characteristics and total soil and nutrient discharge. *Trans. ASAE* 29:1037-1041.
- Zobeck T. M., Fryrear D. W. and Pettit, R. D. 1989. Management effects on wind eroded sediment and plant nutrients. *J. Soil Water Conservation* 44: 160-163.
- Zobeck T. 1991. Soil properties affecting wind erosion. *J. Soil and Water Conservation* 46: 112-118.
- Zobeck T. M., Gill T. E., Stout J. E., Zhang M. L., Kennedy A. C. and Gregory J. M. 1997. Analysis of laboratory-generated dust suspensions derived from soils and roads. Annual International Meeting, Minneapolis, MN, ASAE: 972030.
- Zobeck T. M. and Van Pelt S. 2006. Wind-induced dust generation and transport mechanics on a bare agricultural field. *Journal of Hazardous Materials* 132: 26–38.
- Zobeck T. M., Baddock M., Van Pelt S., Tatarko J. and Acosta-Martínez V. 2013. Soil property effects on wind erosion of organic soils. *Aeolian Research* 10: 43-51.
- Zhuang G., Duce R.A. and Kester D.R. 1990. The dissolution of atmospheric iron in surface seawater of the open ocean. *J. Geophys. Res.* 95: 16207-16216.

- Zubiate C., Demmi M., d'Hidiart A. y Marchi A. 1990. Provincia de San Luis. En Atlas de suelos de la República Argentina. 377-410.
- Zufall M. J., Dai W. and Davidson C. I. 1999. Dry deposition of particles to wave surfaces: II. Wind tunnel experiments. *Atmospheric Environment* 33 (26): 4283-4290.

Anexo 1.

Cantidades erosionadas y parámetros climáticos de los eventos erosivos analizados en los sitios de estudio.

Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
LF	31-ago-07	12,4	SE	10,7	10,7	16,6	46,5	13,1	289	217
LF	03-sep-07	19,07	NE	19,9	19,9	23,7	46,9	19,4	191	19
LF	04-sep-07	483,87	NW	29,5	29,5	35,8	34,6	30,2	182	101
LF	05-sep-07	102,53	NW	22,7	22,7	27,8	31,3	31,4	196	63
LF	08-sep-07	348,15	NE	22,5	22,5	28,7	54	26	462	180
LF	10-sep-07	581,36	NE	24,9	24,9	32,3	31,7	32,3	485	251
LF	14-sep-07	140,87	SW	21,5	21,5	21,5	55,6	26,6	73	73
LF	21-sep-07	29,3	SE	19,7	19,7	24,4	54	23,3	172	22
LF	25-sep-07	90,01	SE	23,6	23,6	27,8	60,6	15,1	602	182
LF	26-sep-07	3,56	NE	s.d.	s.d.	21,6	46,6	14,9	27	s.d.
LF	27-sep-07	32,51	SE	s.d.	s.d.	23,3	56,1	11,9	33	s.d.
LF	28-sep-07	0,84	SW	s.d.	s.d.	22,6	48,3	17,3	75	s.d.
LF	02-oct-07	854,71	NE	24	24	27,6	46,1	27,2	574	159
LF	03-oct-07	7,92	NE	NO	NO	21	56,9	27,4	62	s.d.
LF	04-oct-07	23,55	NE	20,7	20,7	24,4	57,5	29,2	73	10
LF	05-oct-07	559,06	NE	26,9	26,9	36,1	47,3	31,5	146	101
LF	06-oct-07	165,77	SE	21,4	21,4	31,8	66	24,9	219	149
LF	19-oct-07	22,48	NE	20,3	20,3	24,2	61,9	20,4	810	73
LF	25-oct-07	47,39	SE	23	23	26,6	70,2	25,1	367	97
LF	26-oct-07	2,24	SE	21,5	21,5	26,6	53	30,2	190	56
LF	27-oct-07	15,56	SE	21,6	21,6	30,1	58,2	27,4	109	73
LF	28-oct-07	0,11	SE	20,1	20,1	23,8	69,2	25,8	67	10
LF	30-oct-07	24,72	SE	22,8	22,8	26,4	57,2	29,4	310	71
LF	31-oct-07	1,55	SE	19,3	19,3	21,4	68,1	28,3	31	1
LF	06-nov-07	38,77	SE	21,8	21,8	26,4	61,8	21,8	850	194
LF	08-nov-07	4,11	NW	20,9	20,9	29,2	48,5	26,8	235	41
LF	14-nov-07	34,1	SE	20,8	20,8	26,3	63,6	21,2	700	159

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc,	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
LF	15-nov-07	9,98	NE	12,9	22,6	28,3	45,7	18,2	263	109
LF	16-nov-07	15,95	SE	10,1	19,8	26	49,6	20,4	150	21
LF	17-nov-07	2356,15	NE	16,2	26,2	35,1	53,1	29,4	181	117
LF	18-nov-07	116,35	SE	10,5	22	29,1	49,1	33,2	111	53
LF	19-nov-07	64,7	NE	9,9	22,5	23,6	63,6	27,5	119	17
LF	21-nov-07	16,68	SW	7,7	19,8	24,5	56,6	28,8	207	18
LF	22-nov-07	46,53	NE	11	20	27,5	42,3	29	144	41
LF	27-nov-07	26,24	SE	8,5	24,5	24,8	59,1	23	614	77
LF	28-nov-07	5,34	SW	6,1	s.d.	21,4	43,2	27,3	74	s.d.
LF	01-dic-07	342,95	NE	8,5	21,4	25	42,1	31,8	343	59
LF	03-dic-07	1,59	NE	9,1	21	24,1	74,5	31,9	261	30
LF	13-dic-07	302,99	SW	8,7	20,9	23,9	80,2	s.d.	506	44
LF	14-dic-07	3,77	SW	12,1	20,1	25,1	62,2	s.d.	262	27
LF	20-dic-07	4,31	NW	6,4	21,2	23,1	87,5	s.d.	210	26
LF	11-feb-08	6,5	SE	9,5	20,4	30,1	64,4	27,1	129	62
LF	18-feb-08	8,99	SW	5,7	20,02	24,1	65,7	29,7	481	43
LF	05-mar-08	141,18	SE	3,5	24,6	26,4	68,5	31,1	23	7
LF	12-sep-08	138,12	NE	7,2	21	25,2	37,3	16,2	349	88
LF	17-sep-08	19,41	SE	5,5	19,3	22,5	33,9	14,8	379	2
LF	22-sep-08	331,88	SW	4,6	19,3	22,6	46,2	14,5	180	3
LF	24-sep-08	23,14	NE	7,2	NO	23,1	41,8	20,7	166	s.d.
LF	02-oct-08	562,69	NE	9,2	21,5	25,7	43,4	25	740	188
LF	07-oct-08	1740,26	SE	8,7	22,6	27	43,4	21,2	483	159
LF	08-oct-08	69,69	NE	12,4	20,4	24,6	33,1	23,7	181	24
LF	10-oct-08	375,07	NE	8,7	22,8	25,6	39,7	23,3	200	55
LF	21-oct-08	1085,43	NE	14,5	24,5	34	43,4	30	168	114
LF	10-nov-08	874,77	NE	8,1	24,6	24,8	67,3	26,1	223	30

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
LF	12-nov-08	168,89	SE	6,8	19,7	24,4	65,5	23,4	162	11
LF	13-nov-08	4,2	SW	4,4	19,8	22,9	58,1	23,8	59	3
LF	17-nov-08	55,49	SE	8,5	21,9	25,4	59,1	20,8	465	89
LF	19-nov-08	6,46	NE	6	19,3	23,3	46,7	21,4	181	4
LF	26-nov-08	40,1	NE	8,5	20,6	26,1	46,6	26,8	819	17
LF	01-dic-08	40,98	SW	12	19,8	23,6	60,1	246	179	13
LF	02-dic-08	32,44	SW	12,3	20,05	28,5	56,6	23,1	141	67
LF	04-dic-08	46,55	SW	6,3	19,8	24	42,8	22	123	3
LF	05-dic-08	4	SW	5,7	n.d.	21,7	42,5	23,9	90	n.d.
LF	12-dic-08	445,61	SE	7,5	15,1	26,3	53,6	28,6	549	549
LF	26-dic-08	511,99	SW	6,4	21,3	23,9	48,3	28,9	924	38
LF	05-ene-09	76,78	SE	7,7	20,1	23,8	50,6	25,3	644	62
LF	20-feb-09	368,75	NE	5,5	21,2	24,2	68	26,7	816	113
LF	24-feb-09	89,7	SW	6,8	19,7	22,6	68,1	25,2	320	4
LF	27-feb-09	35,45	SW	3	n.d.	21,5	62,6	23,1	48	n.d.
LF	02-mar-09	405,45	NE	7,6	21,4	28,8	52,2	29,5	164	47
LF	03-mar-09	954,12	NE	12,7	22	31,7	51,9	32,5	84	43
LF	06-mar-09	213,52	SW	7,9	20,3	24,6	62	27,2	163	11
LF	11-mar-09	25	SW	2	s.d.	23,1	72	22,3	3	s.d.
LF	16-mar-09	395,53	NW	5	22,3	25,1	54,2	26,7	267	48
LF	19-mar-09	109,33	SE	4,9	20,1	25,2	62,7	24,6	130	41
LF	28-mar-09	3144,75	SW	3,3	22,6	25,2	67,3	24	160	33
LF	23-abr-09	15,38	NE	4,9	n.d.	20,7	68,4	23,3	32	n.d.
LF	28-abr-09	9,36	NE	3,1	n.d.	21,5	64,9	21	70	n.d.
LF	04-may-09	10,18	NE	3,7	n.d.	20,7	50,9	21,5	156	n.d.
LF	19-may-09	12,76	NW	6,1	22	24,9	68,6	18,7	430	72
LF	20-may-09	475,4	NE	9,7	24,4	36,9	70	24	106	80

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
LF	21-may-09	76,09	NW	12,3	20,9	27,3	52,8	26,5	165	56
LF	26-may-09	1,1	NE	5,5	19,8	23,8	72,2	22	237	27
LF	04-jun-09	51,14	NW	8,4	19,8	27,6	56,3	11,6	110	27
LF	16-jun-09	333,45	NW	8,1	21,2	26,6	61	15,7	217	39
LF	18-jun-09	35,12	NE	8,6	19,9	28,2	66,9	15	108	24
LF	29-jun-09	2278,46	NE	7,8	25,6	27,3	61,6	14,4	497	101
LF	30-jun-09	20,36	N E	5,2	n.d.	25,4	54,5	11,2	46	n.d.
LF	07-jul-09	55,37	NE	6	19,6	23,4	58,3	19,5	448	38
LF	08-jul-09	242,53	SW	12,6	20,2	24,8	64,4	20,8	102	13
LF	13-jul-09	309,48	NW	8,5	20,7	27	54,9	11,9	549	198
LF	17-jul-09	10,46	SW	4,2	n.d.	20,9	45,3	10,5	112	n.d.
LF	22-jul-09	407,42	SW	6,2	20,1	24,6	64,7	15,9	276	49
LF	23-jul-09	115,12	SW	14,6	20	25,8	37,4	9,5	236	58
LF	28-jul-09	54,36	NW	3,7	20,3	23,6	43,9	6,1	215	10
LF	30-jul-09	2,77	SW	3,7	n.d.	21,7	42,1	9,3	67	n.d.
LF	05-ago-09	704,29	NE	6,4	22,9	26,5	47,6	14,2	395	96
LF	12-ago-09	785,38	NE	9,7	22,2	27,5	49,4	15,6	826	262
LF	18-ago-09	4999,18	NE	12,2	23,7	29,5	39,3	21	768	327
LF	20-ago-09	66,62	SW	9,6	20,2	25,9	61,5	14,2	234	58
LF	24-ago-09	47,31	NE	5,8	19,7	23,6	50,4	16	303	11
LF	26-ago-09	215,04	NE	9	21,1	26,7	57	22,9	118	20
LF	28-ago-09	323,66	NE	10,7	20,8	28,5	42,1	26,8	140	57
LF	31-ago-09	3935,5	NE	17,8	26,3	34,3	31,7	30,4	342	169
LF	07-sep-09	1215,42	SW	9,1	24,2	26,1	65,5	20,6	480	77
LF	09-sep-09	4,8	SE	16,1	23,5	29,9	41,6	15,5	456	206
LF	15-sep-09	366,86	NE	6,7	21,6	25,2	42,9	17	444	77
LF	28-sep-09	2684,04	SW	11,1	23,7	27,5	56	18,4	1050	279

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
LF	30-sep-09	36,66	SW	8,8	19,8	23,4	35,8	12,5	265	17
LF	04-oct-09	2202,61	NW	4,4	19,3	23,3	38,7	14	123	2
LF	05-oct-09	321,41	NW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LF	06-oct-09	426,81	SW	24,1	24,1	39,2	56,7	24,1	28	28
LF	08-oct-09	127,53	SE	11,9	21,2	25,7	52,8	21,1	180	32
LF	09-oct-09	10,59	NW	7,9	n.d.	23,1	40,1	23,6	62	n.d.
LF	10-oct-09	996,44	NW	19,2	30,7	35,5	44,5	29	116	54
LF	14-oct-09	351,95	NW	13,5	23,7	32,7	35,8	24,8	349	188
LF	16-oct-09	39,27	SE	15,7	21,7	28,4	42,4	21,9	256	74
LF	16-dic-09	8,57	NE	7,7	n.d.	20,9	50,5	29	91	n.d.
LF	28-ene-10	6,88	NW	3,4	n.d.	21,5	58,2	28,7	66	n.d.
LF	29-ene-10	4,39	NE	3,9	n.d.	20,9	26,9	27,9	32	n.d.
LF	04-feb-10	88,21	NE	7,1	22,6	31,6	51,3	33	158	51
LF	05-feb-10	335,35	NE	6,4	20,8	26,5	78	26,2	47	20
LF	06-feb-10	160,13	NE	11,2	23,9	31,8	51,9	33	215	107
LF	09-sep-10	38,18	NE	7,8	20,4	27,7	49,1	23,5	53	13
LF	10-sep-10	97,69	NE	12	20,9	27,8	43,8	26,6	80	31
LF	16-sep-10	1,34	SW	6,6	20,6	27	62	18,6	277	70
LF	17-sep-10	0,91	SE	8,5	n.d.	24,3	48,9	21,8	66	n.d.
LF	18-sep-10	0,67	NW	7,8	19,7	27,3	53,9	18,4	63	4
LF	20-sep-10	1,1	SW	6,3	n.d.	22,1	49,3	23	97	n.d.
LF	04-oct-10	41,45	SE	7,5	20,2	24,6	60,6	21	870	73
LF	06-oct-10	22,49	NE	8,9	20	27,3	51	23,7	126	13
LF	11-oct-10	4,11	NW	5,5	n.d.	22,8	53,5	21,3	104	n.d.
LF	19-oct-10	0,65	NW	8,8	22	25,4	60,2	20,9	583	89
LF	20-oct-10	48,7	NW	8,9	19,3	25,8	42,2	24,3	66	1
LF	28-oct-10	69,7	NE	7,6	20,8	26,2	59,4	22,9	457	91

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
LF	29-oct-10	266,52	NE	11,9	20,6	28,3	39,8	30	94	28
LF	01-nov-10	1752,83	SW	8,8	25,7	31,3	42,6	22,2	234	79
LF	03-nov-10	92,44	NE	7,8	21,2	27	38,4	25	131	38
SR	10-ene-06	2018,40	WSW	12,9	24,64	32,2	33,3	26	35	180,6
SR	12-ene-06	120,51	SE	8,8	23,36	30,7	72,9	20,2	21	180,4
SR	13-ene-06	207,27	SSW	7,5	25,37	32,4	39,7	20,2	15	75
SR	14-ene-06	885,08	ENE	16,3	23,85	34,3	64,3	23,1	31	294
SR	18-ene-06	2375,78	NNE	15,2	23,56	33,3	47,4	22	22	172,8
SR	19-ene-06	15041,16	NNE	11,4	27,9	42,6	53,8	17,3	26	1287
SR	24-ene-06	53,10	NE	8,4	22,2	27,4	58,6	22,2	57	258
SR	26-ene-06	67,21	SW	8,6	19,3	28,5	64	22,1	31	1
SR	27-ene-06	281,88	NNE	9,3	n.d.	30,9	45,3	28,3	19	0
SR	20-feb-06	52,72	NE	9,4	19,3	31,5	51	29	51	2
SR	27-feb-06	1660,38	SSW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SR	19-abr-06	1445,99	NNE	10,5	25,61	28,7	68,4	14,7	168,8	119,4
SR	24-abr-06	1163,02	SSW	4,2	27,06	29,6	52,4	15,2	50,8	20
SR	04-may-06	10,71	NNE	5,8	25,07	26,4	67,5	12,2	123,4	69,2
SR	10-may-06	3,42	N	3,1	22,65	25,5	80,9	11,9	1144	706
SR	30-abr-07	0,24	N	n.d.	22,46	26,2	n.d.	n.d.	205	106
SR	07-may-07	3,19	S	n.d.	25,42	35,1	n.d.	n.d.	136	114
SR	10-may-07	1,27	NNE	n.d.	24,35	31,1	n.d.	n.d.	308	258
SR	23-jul-07	106,63	SSW	n.d.	32,75	33,8	n.d.	n.d.	232	108
SR	30-jul-07	15,40	NE	n.d.	27,37	28,8	n.d.	n.d.	314	151
SR	09-ago-07	4,44	S	n.d.	28,04	41,4	n.d.	n.d.	343	343
SR	13-ago-07	27,30	NNE	n.d.	25,64	30,8	n.d.	n.d.	422	289
SR	16-ago-07	92,39	S	n.d.	26,21	29,0	n.d.	n.d.	444	199
SR	22-ago-07	14,77	N	n.d.	24,71	28,6	n.d.	n.d.	478	284

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc,	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
SR	31-ago-07	91,58	NNE	n.d.	26,11	28,8	n.d.	n.d.	421	220
SR	04-sep-07	733,50	NNE	n.d.	27,15	33,2	n.d.	n.d.	761	586
SR	05-sep-07	4647,55	S	n.d.	30,68	41,3	n.d.	n.d.	149	127
SR	12-jun-08	63,9	SW	9,5	27,95	38,9	53	8,1	43	33
SR	15-jun-08	183,3	SW	17,2	28,69	33,1	38,9	7,8	1428	968
SR	03-sep-08	380,7	SW	14,7	25,38	36,0	43,6	38,2	205	123
SR	17-sep-08	56,8	NE	17,6	25,74	31,6	49,4	13,9	692	483
SR	22-sep-08	128,6	SE	11,7	23,54	29,7	62,6	10,3	514	259
SR	26-sep-08	23,5	NE	22,1	25,01	30,8	45,7	19,9	298	226
SR	10-oct-08	146,9	NE	24,6	26,85	34,5	43,4	16	801	701
SR	05-dic-08	9,51	SW	13,2	23,54	31,2	53,4	23,4	183	134
SR	11-dic-08	1,41	NE	9,7	19,3	27,5	66,3	19,6	20	1
SR	03-abr-09	1,94	SW	7,6	n.d.	24,9	54,8	20,8	50	n.d.
SR	08-abr-09	0,72	NE	3,8	n.d.	29	55	17,1	18	n.d.
SR	16-abr-09	0,26	SW	5,3	n.d.	26,8	57	18,9	23	n.d.
SR	24-abr-09	10	SW	3,3	n.d.	32,8	41,9	14,4	14	n.d.
SR	30-abr-09	2,89	SW	5,4	n.d.	23,8	53,8	18,3	19	n.d.
SR	05-jun-09	5,41	NE	2,7	n.d.	37,2	58,8	11,4	7	n.d.
SR	16-jun-09	6,08	SW	4,6	n.d.	25,4	61,5	8,9	32	n.d.
SR	29-jun-09	238,99	SW	15,4	27,2	31,6	65,8	8,1	471	286
SR	30-jun-09	122,29	NE	30,5	30,8	47,4	30,1	16	70	68
SR	01-jul-09	3,63	SW	24,6	26,4	37,8	26,5	15	77	66
SR	19-nov-09	1596,43	SW	25,0	26,4	39,3	26,3	22,1	87	76
SR	03-dic-09	5581,19	SW	18,0	27,5	38,6	46	17,2	196	162
VM	12-dic-07	2,45	NE	5,7	n.d.	24,8	36,2	21	64	0
VM	14-dic-07	846,12	NW	7,7	23,1	28,5	39,3	25,7	102	3
VM	17-dic-07	81,1	NE	7,2	19,5	28	43,1	20,8	124	9

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
VM	18-dic-07	14,03	NW	6,6	n.d.	22	36,6	26,4	31	0
VM	20-dic-07	5,96	NW	6,9	n.d.	24	38,2	27	88	0
VM	21-dic-07	1,18	NW	6,1	n.d.	24,3	42,7	27,8	36	0
VM	22-dic-07	30,67	NE	7,1	n.d.	24	29,1	26,3	66	0
VM	23-dic-07	163,99	NW	10,8	19,6	27	58,8	21,6	83	15
VM	28-dic-07	11,33	NW	5,2	21,6	28,9	70,6	21,9	139	30
VM	29-dic-07	3,14	NE	5,3	n.d.	20,5	59,9	22,3	18	0
VM	30-dic-07	88,35	SE	3,3	23,6	34,9	51,5	25,6	6	3
VM	02-ene-08	4,33	SE	2,4	n.d.	21,1	56,5	24,9	26	0
VM	03-ene-08	7,05	SE	3,7	n.d.	21	49,2	26,8	15	0
VM	04-ene-08	27,66	NE	5,4	19,3	25,8	39,3	23,3	39	2
VM	06-ene-08	24,7	NE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	07-ene-08	340,6	SW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	09-ene-08	57,51	SW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	11-ene-08	58,48	SW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	13-ene-08	115,1	NE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	16-ene-08	126,34	SE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	19-ene-08	4,53	SW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	22-ene-08	305,1	SW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	28-ene-08	202,38	NE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	02-feb-08	5,59	SE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	19-dic-08	282,96	SW	4,8	25,7	24,7	76,3	21,3	62	3
VM	20-dic-08	10,9	SW	5,7	n.d.	27,5	61,7	26,4	36	n.d.
VM	21-dic-08	106,24	SE	5,4	19,3	27	80,2	19,4	34	1
VM	21/12/08 (II)	1104,57	SW	11,9	n.d.	29,7	46	20,8	19	n.d.
VM	23-dic-08	34,74	SW	5,5	n.d.	25,9	83	16,5	48	n.d.

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
VM	25-dic-08	431,07	SE	4,3	n.d.	23,7	63,8	23,7	37	n.d.
VM	26-dic-08	6,15	SW	0,8	n.d.	19,9	63,6	21,8	5	n.d.
VM	26/12/08 (II)	1,34	SW	4,5	n.d.	20,9	38,9	28,7	9	n.d.
VM	28-dic-08	14,86	NE	5,2	21,7	28,2	58,8	22,4	39	6
VM	31-dic-08	361,41	SW	5	26,3	26,6	53,2	23,8	80	6
VM	03-ene-09	42,47	NW	7,9	19,6	25,7	84,1	16,3	117	6
VM	06-ene-09	21,69	NW	6,6	19,8	24,8	55	23,2	106	3
VM	09-ene-09	10,79	NE	3,3	n.d.	21,1	55,5	22	21	n.d.
VM	12-ene-09	239,18	NW	5,9	20,4	28,9	52,4	23,2	154	21
VM	16-ene-09	13,15	SW	3,1	n.d.	23,9	65,6	22	61	n.d.
VM	16/01/09 (II)	1,44	NE	7,1	n.d.	24,2	60,8	22,8	18	n.d.
VM	17-ene-09	8,57	NE	3,3	n.d.	23,9	63,5	23,1	73	n.d.
VM	22-ene-09	35,34	NE	4,7	n.d.	22,9	52,8	22,1	110	n.d.
VM	22/01/09 (II)	10,13	NW	10,2	n.d.	25,9	22,2	33,9	33	n.d.
VM	23-ene-09	0,67	NW	4,5	n.d.	20,6	60,9	19,9	5	n.d.
VM	23/01/09 (II)	2,3	NW	6,4	n.d.	22,4	20,2	34,5	18	n.d.
VM	24-ene-09	1,97	NW	6	n.d.	22,1	54,9	22	4	n.d.
VM	31-ene-09	710,5	NW	5,6	19,3	25	54,7	23,3	260	2
PC	18-dic-07	77,59	W	17	25,8	33,9	12,3	12,4	2301	1492
PC	16-ene-08	27,54	W	17,9	25,9	34,6	13,1	13,2	1942	1346
PC	14-feb-08	67,44	NW	12,9	23,3	29,1	18,3	18,4	2532	1179
PC	27-feb-08	80	WSW	9,8	21,2	24,9	19,4	19,5	880	130
PC	18-mar-08	77,04	NE	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d
PC	30-abr-08	227,19	W	12,4	23,7	28,4	6,5	6,6	2219	946
PC	13-may-08	1,84	WSW	8,2	22,2	24,1	4,8	4,9	314	61
PC	21-oct-09	146,82	WSW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	13-nov-09	55,83	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
PC	07-ene-10	248,39	N	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	04-feb-10	198,35	NW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	02-mar-10	374,88	SW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	05-oct-10	151,97	NW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	19-oct-10	34,59	SW	11,5	24	31,3	50,4	9,4	349	133
PC	18-nov-10	11,07	NE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	29-dic-10	858,17	NW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	26-ene-11	354,7	W	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	16-mar-11	297,73	NW	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RM	14-feb-08	22,08	NW	7,5	23,7	31,6	54,3	20,1	111	26
RM	14-oct-08	152,73	SW	9,2	23,2	32,8	44,2	13,6	133	39
RM	09-nov-08	296,25	SE	11,8	23,2	33	37,3	17,4	450	200
RM	03-dic-08	21,9	SW	6,6	21,9	25,7	44,3	18,8	1150	127
RM	23-ene-09	92,05	SE	11,2	23,6	29,4	36,8	22,4	797	276
PA	22-ene-10	2,01	SW	45,8	45,8	61,9	33,6	14,1	149	149
PA	24-ene-10	6,9	NE	44,2	44,2	58,6	35,5	14,1	125	125
PA	26-ene-10	1,3	NE	42,9	42,9	58	50,2	11,5	143	143
PA	04-dic-10	1,97	SW	38,9	38,9	52,7	55,4	8,3	289	289
PA	09-dic-10	3,7	SW	26,4	29,8	40,2	51,8	6,9	267	235
PA	12-dic-10	3,79	NW	35,5	35,5	48,3	60,1	9,9	289	289
PA	14-dic-10	40,95	NE	34,2	47,8	59	52,1	6,2	214	192
AP	17-oct-11	13,58	S	12,9	27	36,7	15,8	8,7	829	4145
AP	04-nov-11	21,76	S	9,2	24	27,5	41,7	11,4	529	2645
AP	11-nov-11	226,15	E	8,8	25,2	29	38,3	13,5	237	1185
AP	14-nov-11	21,7	S	12,1	25,5	30,3	36,6	14	171	855
AP	30-ago-12	1,89	S	4,3	n.d.	22,9	15,2	4,6	n.d.	n.d.
AP	31-ago-12	61,78	E	7,8	21,8	27,6	13,7	8,8	21	105

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
AP	03-sep-12	9,55	S	6,8	22,6	28,2	29,9	8,8	77	385
AP	04-sep-12	13,18	E	9,2	22,8	32	29,6	7,8	62	310
AP	05-sep-12	0,84	E	4,5	19,3	23,4	24,2	8,7	3	15
AP	06-sep-12	2,45	E	12	23,1	29,7	31,7	13	55	275
AP	07-sep-12	42,52	N	9,5	26,5	34,1	9,1	10,5	55	275
AP	10-sep-12	35,2	E	6,4	22,7	29,6	19,2	10,5	92	460
AP	11-sep-12	0,11	N	2,3	n.d.	21,3	11,4	9,4	n.d.	n.d.
AP	12-sep-12	1,51	S	9	23,8	32,1	38,2	11,4	57	285
AP	14-sep-12	0,23	W	6,7	22,3	27,1	42,1	11	26	130
AP	17-sep-12	4,62	W	4,5	21,7	25,9	32,2	11	25	125
AP	18-sep-12	0,85	S	4,5	21,4	24,1	17,3	9,5	6	30
AP	19-sep-12	2091,27	N	18,5	34,8	43,3	13,3	7,4	101	505
AP	20-sep-12	3,74	W	9,9	27,4	37,7	9,7	3,3	53	265
AP	21-sep-12	10,63	N	11,3	31,4	46	9,7	6,2	80	400
AP	25-sep-12	0,63	W	6,1	23,4	26,9	30	8,7	73	365
AP	26-sep-12	0,68	E	10	19,5	24,1	47,3	10,7	14	70
AP	27-sep-12	1,1	E	9,2	20,8	26,6	50,5	11,5	24	120
AP	28-sep-12	1,39	W	8,7	21,5	30,4	13,7	9,2	50	250
AP	01-oct-12	3,2	W	4,7	23,5	30,1	12,3	9,4	68	340
AP	02-oct-12	3,45	S	7,1	21,8	29,9	34,6	13	33	165
AP	03-oct-12	0,84	W	7,3	24,5	32,1	12,5	9,4	40	200
AP	04-oct-12	0,25	W	5,8	19,8	25,5	37,1	12	10	50
AP	05-oct-12	9,62	N	6,1	21,9	28	17,2	8,9	18	90
AP	09-oct-12	8,8	E	6,3	22,7	31,1	10	10	152	760
AP	10-oct-12	0,52	E	7,9	23,5	31	27,8	11,6	46	230
AP	11-oct-12	1,69	S	9	23,6	31,1	57,7	8,4	47	235
AP	12-oct-12	0,45	S	4,2	21,3	27,3	39,9	7,8	9	45

Continuación A1. Tabla A. Cantidades erosionadas y parámetros de las tormentas analizadas en las localidades de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Pérdida Material	Direcc. viento	Velocidad promedio	Vel. Med. Per. Exc.	Vel. Máx. Per. Exc.	Humedad	Temp Media	Veces exc. en Vel Max	Per. Exc.
		kg ha ⁻¹		km h ⁻¹	km h ⁻¹	km h ⁻¹	%	°C		
AP	15-oct-12	3	N	5,1	21,8	29,2	34,2	11,2	55	275
AP	16-oct-12	0,54	N	2,6	n.d.	22,3	9	9,6	n.d.	n.d.
AP	17-oct-12	0,92	S	4	23,5	31,1	20,5	10,8	16	80
AP	18-oct-12	1,81	N	6,4	28,7	40,5	31,9	12	34	170
AP	19-oct-12	1,35	E	10,6	26,2	36	11,1	19,4	36	180
AP	22-oct-12	4,39	N	5,5	25,1	31,8	8,7	11	122	610
AP	23-oct-12	1,92	NW	8,9	24,4	37,1	7,2	10,3	74	370
AP	24-oct-12	16,73	NW	8,7	24,8	36,1	6,6	10,1	72	360
AP	25-oct-12	0,267	NW	3,9	20,3	24,4	5,4	11,3	5	25
AP	26-oct-12	0,546	NW	4,4	24,8	31	8,3	12,9	25	125

Anexo 2

Flujo de masa (FM) y parámetros de la función utilizada, para los eventos erosivos de los sitios estudiados.

Tabla A. Flujo de masa (FM) de 0 a 150 cm, FM de 13,5 a 150 cm y parámetros de la función utilizada, de las tormentas analizadas en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función		Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función	
		de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$				de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$	
		(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b			(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b
LF	31-ago-07	0,1278	0,0925	0,3045	-2,3078	LF	30-oct-07	0,4195	0,1442	3,3174	-7,9066
LF	03-sep-07	0,1271	0,0635	0,6535	-5,1381	LF	31-oct-07	0,0146	0,01331	0,010012	-0,03206
LF	04-sep-07	15,3355	5,4546	117,4251	-7,6571	LF	06-nov-07	0,3321	0,1308	2,2904	-6,8965
LF	05-sep-07	0,9283	0,2773	8,3088	-8,95	LF	08-nov-07	0,0974	0,0832	0,11048	-7,8406
LF	08-sep-07	3,2419	1,0632	26,7866	-8,2603	LF	14-nov-07	0,3917	0,1933	2,05007	-5,2308
LF	10-sep-07	11,0964	3,75707	89,0089	-8,0216	LF	15-nov-07	0,0771	0,0384	0,39806	-5,1593
LF	14-sep-07	1,91566	0,78513	12,6559	-6,6064	LF	16-nov-07	0,1578	0,0656	1,0257	-6,4991
LF	21-sep-07	0,4746	0,1317	4,5063	-9,4947	LF	17-nov-07	8,7387	3,5506	58,294	-6,6707
LF	25-sep-07	0,0902	0,0418	0,51297	-5,6859	LF	18-nov-07	1,6274	0,5919	12,1923	-7,4917
LF	26-sep-07	0,0262	0,02202	0,03334	-0,9772	LF	19-nov-07	0,8256	0,2787	6,6394	-8,0417
LF	27-sep-07	0,276	0,2043	0,61034	-2,1195	LF	21-nov-07	0,1019	0,0384	0,7365	-7,2231
LF	28-sep-07	0,00983	0,0013	0,14506	-1,4746	LF	22-nov-07	0,6009	0,3326	2,6316	-4,3729
LF	02-oct-07	8,1711	2,6763	67,5936	-8,2699	LF	27-nov-07	0,235	0,0981	1,5195	-6,4647
LF	03-oct-07	0,059	0,0485	0,08351	-1,1708	LF	28-nov-07	0,0038	0,0009	0,04136	-10,6697
LF	04-oct-07	0,4588	0,0796	5,9512	-12,9681	LF	01-dic-07	2,2874	1,1531	11,6032	-5,0699
LF	05-oct-07	8,4537	2,5568	74,887	-8,8583	LF	03-dic-07	0,0688	0,0013	1,9984	-2,9031
LF	06-oct-07	3,3685	1,0951	28,0527	-8,3255	LF	13-dic-07	4,0053	1,0357	10,1291	-10,0186
LF	19-oct-07	0,1782	0,1095	0,64101	-3,5812	LF	14-dic-07	0,0889	0,0267	0,7905	-8,8894
LF	25-oct-07	0,4965	0,2506	2,5142	-5,0608	LF	20-dic-07	0,0224	0,0114	0,1119	-4,9813
LF	26-oct-07	0,0352	0,0214	0,12998	-3,671	LF	11-feb-08	0,0962	0,0419	0,5915	-6,148
LF	27-oct-07	0,1546	0,0485	1,3267	-8,5792	LF	18-feb-08	0,091	0,0346	0,6512	-7,1507
LF	28-oct-07	0,0123	0,00096	0,23405	-18,9158	LF	05-mar-08	4,9072	1,1074	54,1136	-11,0269

Continuación A2. Tabla A. Flujo de masa (FM) de 0 a 150 cm, FM de 13,5 a 150 cm y parámetros de la función utilizada, de las tormentas analizadas en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función		Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función	
		de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$				de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$	
		(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b			(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b
LF	12-sep-08	3,9727	1,1275	37,0628	-9,3292	LF	20-feb-09	11,2435	2,8518	114,2563	-10,1617
LF	17-sep-08	1,1022	0,2673	11,5664	-10,4928	LF	24-feb-09	2,4938	0,563	27,4938	-11,0243
LF	22-sep-08	14,5946	4,4421	128,601	-8,8114	LF	27-feb-09	0,4655	0,2894	1,6354	-3,4946
LF	24-sep-08	0,2848	0,1249	1,7396	-6,1059	LF	02-mar-09	17,8526	2,8752	241,4807	-13,526
LF	02-oct-08	16,5743	3,7043	183,0265	-11,0762	LF	03-mar-09	39,4744	6,7719	515,4806	-13,0582
LF	07-oct-08	22,4196	15,7105	58,804	-2,5671	LF	06-mar-09	3,8769	1,3691	29,8937	-7,7106
LF	08-oct-08	0,7643	0,3724	4,0701	-5,3228	LF	11-mar-09	1,0307	0,2239	11,6567	-11,309
LF	10-oct-08	7,9136	1,984	81,0997	-10,2479	LF	16-mar-09	9,4507	2,4936	93,273	-9,8692
LF	21-oct-08	13,344	4,4492	108,5597	-8,1356	LF	19-mar-09	1,8312	0,3131	23,9596	-13,0836
LF	10-nov-08	12,6855	4,3564	100,4327	-7,9172	LF	28-mar-09	10,4983	4,1148	72,8289	-6,9373
LF	12-nov-08	13,9073	5,3775	97,8743	-7,0378	LF	23-abr-09	0,1798	0,0782	1,1074	-6,1578
LF	13-nov-08	0,1829	0,067	1,3606	-7,4381	LF	28-abr-09	9,099	0,0384	0,6934	-7,0009
LF	17-nov-08	0,7349	0,3907	3,4379	-4,6736	LF	04-may-09	0,1574	0,0454	1,4494	-9,203
LF	19-nov-08	0,0651	0,0342	0,3106	-4,7629	LF	19-may-09	0,3253	0,0952	2,9582	-9,0932
LF	26-nov-08	1,1383	0,4508	7,8092	-6,86	LF	20-may-09	14,1956	3,244	155,2217	-10,9342
LF	01-dic-08	0,7884	0,3216	5,2357	-6,6408	LF	21-may-09	3,1827	0,5266	42,4131	-13,3257
LF	02-dic-08	0,8079	0,2524	6,9605	-8,6157	LF	26-may-09	0,2702	0,0656	2,8328	-10,4818
LF	04-dic-08	0,5578	0,1947	4,3496	-7,7972	LF	04-jun-09	2,5968	0,3557	38,2373	-14,7244
LF	05-dic-08	0,0109	0,0063	0,0443	-4,0463	LF	16-jun-09	18,1435	2,6417	258,9697	-14,2731
LF	12-dic-08	9,4636	3,6122	67,509	-7,1337	LF	18-jun-09	2,5801	0,3611	37,5834	-14,5664
LF	26-dic-08	9,5833	3,6286	68,9331	-7,1932	LF	29-jun-09	58,906	14,6793	606,309	-10,2926
LF	05-ene-09	0,7439	0,3361	4,3763	-5,882	LF	30-jun-09	0,6313	0,1504	6,7066	-10,623

Continuación A2. Tabla A. Flujo de masa (FM) de 0 a 150 cm, FM de 13,5 a 150 cm y parámetros de la función utilizada, de las tormentas analizadas en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función		Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función	
		de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$				de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$	
		(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b			(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b
LF	07-jul-09	2,4606	0,4781	29,8603	-12,135	LF	05-oct-09	8,3114	1,8593	91,7242	-11,0692
LF	08-jul-09	6,068	1,2271	71,8448	-11,8396	LF	06-oct-09	5,4871	2,0066	40,8872	-7,4515
LF	13-jul-09	15,214	2,3624	209,9046	-13,7965	LF	08-oct-09	1,3283	0,6443	7,11679	-5,3558
LF	17-jul-09	0,218	0,0633	1,9961	-9,1562	LF	09-oct-09	0,2093	0,0691	1,7181	-8,2058
LF	22-jul-09	0,9352	0,30805	7,698	-8,2284	LF	10-oct-09	35,4009	10,3138	323,327	-9,1331
LF	23-jul-09	1,6688	0,5002	14,8932	-8,9241	LF	14-oct-09	69,6868	13,0989	862,8403	-12,3813
LF	28-jul-09	1,1897	0,279	12,7786	-10,7405	LF	16-oct-09	0,5942	0,1598	5,7801	-9,7269
LF	30-jul-09	0,0459	0,0309	0,1343	-2,8826	LF	16-dic-09	0,1662	0,0737	1,0006	-6,0176
LF	05-ago-09	33,4909	5,6453	441,7027	-13,1884	LF	28-ene-10	0,1009	0,0496	0,5304	-5,2508
LF	12-ago-09	47,4222	8,4394	606,3778	-12,7864	LF	29-ene-10	0,0547	0,0473	0,0579	-0,6716
LF	18-ago-09	122,501	50,0944	811,3488	-6,623	LF	04-feb-10	2,3778	0,7648	19,9904	-8,4044
LF	20-ago-09	1,3692	0,4225	11,9245	-8,7093	LF	05-feb-10	6,3852	2,0285	54,2341	-8,4938
LF	24-ago-09	1,2477	0,2864	13,5994	-10,899	LF	06-feb-10	3,0722	0,9268	27,2733	-8,8771
LF	26-ago-09	12,2229	1,7427	176,3578	-14,4282	LF	09-sep-10	0,6457	0,2225	5,0951	-7,8901
LF	28-ago-09	19,3648	2,5936	288,3802	-14,8918	LF	10-sep-10	1,7788	0,566	15,0881	-8,4821
LF	31-ago-09	79,8094	21,0436	736,6852	-9,5909	LF	16-sep-10	0,036	0,0168	0,20368	-5,6471
LF	07-sep-09	27,2615	9,268	217,8737	-7,9921	LF	17-sep-10	0,02268	0,0112	11,778	-5,1898
LF	09-sep-09	4,1323	1,1398	39,4247	-9,5404	LF	18-sep-10	0,0135	0,0071	0,0646	-4,7629
LF	15-sep-09	16,0177	3,0197	197,9736	-12,3593	LF	20-sep-10	0,0154	0,0078	0,0772	-4,988
LF	28-sep-09	29,7184	16,854	124,7775	-4,1908	LF	04-oct-10	2,9278	1,0483	22,2761	-7,6082
LF	30-sep-09	0,7636	0,1758	8,30721	-10,8775	LF	06-oct-10	0,713	0,1912	6,9513	-9,7492
LF	04-oct-09	96,9768	17,9823	1210,505	-12,4821	LF	11-oct-10	0,1112	0,0527	0,615	-5,5261

Continuación A2. Tabla A. Flujo de masa (FM) de 0 a 150 cm, FM de 13,5 a 150 cm y parámetros de la función utilizada, de las tormentas analizadas en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función		Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función	
		de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	Coefic. a	Coefic. b			de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	Coefic. a	Coefic. b
		(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)					(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)		
LF	19-oct-10	0,0147	0,0095	0,047	-3,1676	SR	07-may-07	0,123389	0,085218	0,337014	-2,682516
LF	20-oct-10	0,1189	0,077	0,3809	-3,1763	SR	10-may-07	0,025269	0,018025	0,062921	-2,424399
LF	28-oct-10	4,2058	0,6395	58,6796	-13,9516	SR	23-jul-07	2,12506	1,351	7,117272	-3,326386
LF	29-oct-10	12,7313	2,0449	172,4584	-13,5457	SR	30-jul-07	0,127838	0,077806	0,469637	-3,65844
LF	01-nov-10	24,5388	11,0217	145,472	-5,9274	SR	09-ago-07	0,190055	0,0922	1,01814	-5,355309
LF	03-nov-10	3,2378	0,6141	39,8735	-12,3144	SR	13-ago-07	0,250118	0,171779	0,693615	-2,72678
SR	10-ene-06	12,8632	7,81475	47,428	-3,6722	SR	16-ago-07	0,914872	0,50766	3,98923	-4,354021
SR	12-ene-06	1,43544	0,77513	6,54951	-4,55786	SR	22-ago-07	0,167815	0,121688	0,397228	-2,290906
SR	13-ene-06	2,80805	1,67659	10,7164	-3,8036	SR	31-ago-07	0,489623	0,338439	1,334268	-2,675914
SR	14-ene-06	5,31168	3,3003	18,6971	-3,50154	SR	04-sep-07	3,915	2,85378	9,113841	-2,248058
SR	18-ene-06	24,3073	15,7004	78,5384	-3,20463	SR	05-sep-07	45,0652	26,7107	174,4351	-3,85885
SR	19-ene-06	163,048	69,4313	1030,99	-6,32287	SR	12-jun-08	0,524752	0,420282	0,851219	-1,43311
SR	24-ene-06	0,634642	0,321645	3,194199	-5,030359	SR	15-jun-08	1,09138	0,647433	4,217444	-3,852335
SR	26-ene-06	0,743413	0,365079	3,915419	-5,264814	SR	03-sep-08	4,06643	2,04803	20,6558	-5,07704
SR	27-ene-06	3,38061	1,37171	22,5584	-6,680806	SR	17-sep-08	0,9064	0,244197	8,805849	-9,714947
SR	20-feb-06	0,17444	0,138297	0,29633	-1,526676	SR	22-sep-08	1,26675	0,66028	6,1118	-4,821295
SR	27-feb-06	12,5709	7,84449	43,8457	-3,468655	SR	26-sep-08	0,20185	0,1419	0,52388	-2,53773
SR	19-abr-06	11,5364	4,54952	79,50661	-6,89189	SR	10-oct-08	2,31625	1,50837	7,34286	-3,14165
SR	24-abr-06	11,494	6,31045	51,02807	-4,433752	SR	05-dic-08	0,23406	0,0833	1,791203	-7,65253
SR	04-may-06	0,131469	0,067425	0,650132	-4,942095	SR	11-dic-08	0,135306	0,0279	1,580201	-11,6784
SR	10-may-06	0,061917	0,042713	0,16965	-2,69178	SR	03-abr-09	0,0711	0,01897	0,69589	-9,78643
SR	30-abr-07	0,035573	0,021631	0,130918	-3,665169	SR	08-abr-09	0,031127	0,013091	0,199685	-6,414779

Continuación A2. Tabla A. Flujo de masa (FM) de 0 a 150 cm, FM de 13,5 a 150 cm y parámetros de la función utilizada, de las tormentas analizadas en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función		Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función	
		de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	Coefic. a	Coefic. b			de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	Coefic. a	Coefic. b
		(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)					(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)		
SR	16-abr-09	0,294307	0,09023	2,577427	-8,757496	VM	03-ene-08	0,1062	0,0443	0,6876	-6,4766
SR	24-abr-09	0,39225	0,153452	2,72664	-6,951386	VM	04-ene-08	0,7269	0,3347	4,176	-5,7438
SR	30-abr-09	0,056744	0,025231	0,340626	-6,002132	VM	06-ene-08	0,5173	0,2395	2,9501	-5,7018
SR	05-jun-09	0,185157	0,08889	1,00623	-5,43288	VM	07-ene-08	6,2687	2,733	38,545	-6,1484
SR	16-jun-09	0,171345	0,064339	1,24305	-7,25502	VM	09-ene-08	0,9775	0,4693	5,3124	-5,4333
SR	29-jun-09	12,2657	2,27487	153,0879	-12,4806	VM	11-ene-08	2,1872	0,927	13,906	-6,3576
SR	30-jun-09	4,67206	1,24973	45,6371	-9,767946	VM	13-ene-08	2,5745	1,3066	12,931	-5,0198
SR	01-jul-09	0,19654	0,06095	1,704281	-8,671611	VM	16-ene-08	2,0819	0,9718	11,748	-5,6419
SR	19-nov-09	41,1298	9,7711	437,906	-1,06467	VM	19-ene-08	0,3392	0,1707	1,7251	-5,0831
SR	03-dic-09	133,836	30,8177	1455,89	-10,878	VM	22-ene-08	10,0792	4,2966	63,655	-6,3151
VM	12-dic-07	0,1848	0,0639	1,45343	-7,8645	VM	28-ene-08	2,138	0,7452	16,692	-7,8075
VM	14-dic-07	16,24	8,3307	80,281	-4,9404	VM	02-feb-08	0,4666	0,1528	3,8614	-8,2726
VM	17-dic-07	4,4078	1,9924	25,924	-5,8804	VM	19-dic-08	5,4031	2,1122	37,5887	-6,957
VM	18-dic-07	0,1875	0,1485	0,3197	-1,5344	VM	20-dic-08	0,1999	0,0748	1,4557	-7,2796
VM	20-dic-07	0,3	0,1366	1,7485	-5,8273	VM	21-dic-08	2,2674	0,6693	20,4897	-9,0366
VM	21-dic-07	0,0646	0,05349	0,0886	-1,1135	VM	21-dic-08II	28,2562	6,744	299,8704	-10,6123
VM	22-dic-07	0,4183	0,2049	2,2103	-5,2825	VM	23-dic-08	0,6045	0,2083	4,7705	-7,892
VM	23-dic-07	4,0973	0,3691	73,049	-1,783	VM	25-dic-08	6,3701	2,3738	46,5822	-7,3123
VM	28-dic-07	0,305	0,1506	1,5943	-5,2244	VM	26-dic-08	0,0682	0,0593	0,06843	-0,5892
VM	29-dic-07	0,068	0,0434	0,2256	-3,2962	VM	26-dic-08 II	0,011	0,005	0,06416	-5,8088
VM	30-dic-07	1,7233	0,7453	10,6987	-6,2079	VM	28-dic-08	0,252	0,1098	1,551	-6,1537
VM	02-ene-08	0,1563	0,078	0,8041	-5,1434	VM	31-dic-08	4,11	2,5601	14,391	-3,4825

Continuación A2. Tabla A. Flujo de masa (FM) de 0 a 150 cm, FM de 13,5 a 150 cm y parámetros de la función utilizada, de las tormentas analizadas en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función		Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función	
		de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$				de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$	
		(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b			(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b
VM	03-ene-09	1,459	0,4109	13,696	-9,3871	PC	07-ene-10	3,4451	2,6689	6,4492	-1,7327
VM	06-ene-09	0,2277	0,1169	1,1248	-4,936	PC	04-feb-10	3,8188	2,8987	7,7308	-1,9089
VM	09-ene-09	0,1228	0,0634	0,6018	-4,8957	PC	02-mar-10	7,4674	5,0147	21,9618	-2,9032
VM	12-ene-09	2,3266	1,3348	9,5689	-4,1041	PC	05-oct-10	1,7133	1,0208	6,5648	-3,8191
VM	16-ene-09	0,1588	0,0686	0,98718	-6,2171	PC	19-oct-10	0,5038	0,2956	1,9882	-3,9354
VM	16-ene-09II	0,031	0,0098	0,26309	-8,4956	PC	18-nov-10	1,1848	0,3226	11,4178	-9,636
VM	17-ene-09	0,0721	0,0533	0,1601	-2,1305	PC	29-dic-10	7,2654	5,5742	14,1275	-1,817
VM	22-ene-09	0,5514	0,1939	4,2688	-7,7418	PC	26-ene-11	4,3541	2,4207	18,9248	-4,3398
VM	22-ene-09II	0,0753	0,0413	0,33576	-4,4507	PC	16-mar-11	3,6892	2,0178	16,482	-4,462
VM	23-ene-09	0,0142	0,0049	0,11169	-7,852	RM	14-feb-08	0,2146	0,132	0,7719	-3,5796
VM	23-ene-09II	0,0367	0,0318	0,037314	-0,61009	RM	14-oct-08	2,08642	0,9552	12,07280	-5,78540
VM	24-ene-09	0,0125	0,0076	0,04597	-3,6684	RM	09-nov-08	3,61669	1,8276	18,28180	-5,05221
VM	31-ene-09	6,3357	3,1871	32,2392	-5,086	RM	03-dic-08	0,0779	0,0389	0,39960	-5,12660
PC	18-dic-07	2,7713	1,4927	12,6966	-4,5765	RM	23-ene-09	1,00281	0,5945	3,88052	-3,85772
PC	16-ene-08	4,8468	2,9366	17,9684	-3,6927	PA	22-ene-10	0,024	0,015	0,088599	-3,657466
PC	14-feb-08	1,7661	1,0647	6,6125	-3,7302	PA	24-ene-10	0,0759	0,0429	0,320627	-4,214613
PC	27-feb-08	0,2209	0,1141	1,0805	-4,887	PA	26-ene-10	0,01913	0,0121	0,064555	-3,35168
PC	18-mar-08	0,8118	0,5116	2,772	-3,3932	PA	04-dic-10	0,0394	0,03258	0,054227	-1,120723
PC	30-abr-08	12,4703	6,5330	59,6988	-4,7835	PA	09-dic-10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	13-may-08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	PA	12-dic-10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	21-oct-09	2,5288	1,7717	6,6359	-2,5684	PA	14-dic-10	0,4228	0,23363	1,857058	-4,385796
PC	13-nov-09	1,6672	1,1484	4,5874	-2,7038	AP	17-oct-11	0,2911	0,1146	2,0084	-6,8998

Continuación A2. Tabla A. Flujo de masa (FM) de 0 a 150 cm, FM de 13,5 a 150 cm y parámetros de la función utilizada, de las tormentas analizadas en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función		Sitio	Fecha	FM	FM	Datos de la función	
		de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$				de 0 a 150 cm	de 13,5 a 150 cm	$y = ae^{bx}$	
		(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b			(kg.m ⁻¹)	(kg.m ⁻¹)	Coefic. a	Coefic. b
AP	04-nov-11	0,3417	0,1261	2,5241	-7,385	AP	28-sep-12	0,0153	0,0096	0,0521	-3,3971
AP	11-nov-11	2,5083	1,1242	0,1491	-5,9432	AP	01-oct-12	0,0192	0,0092	0,1049	-5,4656
AP	14-nov-11	0,4323	0,1693	3,0011	-6,9423	AP	02-oct-12	0,0406	0,0176	0,2505	-6,1764
AP	30-ago-12	0,0097	0,006	0,0345	-3,5452	AP	03-oct-12	0,0105	0,0049	0,0592	-5,6339
AP	31-ago-12	0,7166	0,3171	4,327	-6,0371	AP	04-oct-12	0,004	0,0036	0,0035	-0,356
AP	03-sep-12	0,0841	0,0368	0,5149	-6,1169	AP	05-oct-12	0,0934	0,0391	0,6023	-6,4455
AP	04-sep-12	0,0881	0,0491	0,3824	-4,3321	AP	09-oct-12	0,0663	0,0376	0,2785	-4,1947
AP	05-sep-12	0,0086	0,004	0,04891	-5,671	AP	10-oct-12	0,0137	0,0117	0,0152	-0,7507
AP	06-sep-12	0,0334	0,0137	0,2204	-6,5906	AP	11-oct-12	0,0172	0,0077	0,1023	-5,937
AP	07-sep-12	0,2943	0,1386	1,641	-5,5728	AP	12-oct-12	0,0058	0,004	0,0153	-2,5964
AP	10-sep-12	0,0732	0,0431	0,2875	-3,9153	AP	15-oct-12	0,0425	0,0217	0,2115	-4,9757
AP	11-sep-12	0,0078	0,0043	0,035	-4,4558	AP	16-oct-12	0,0058	0,0047	0,0093	-1,406
AP	12-sep-12	0,0279	0,0113	0,1875	-6,7055	AP	17-oct-12	0,0164	0,0069	0,105	-6,3998
AP	14-sep-12	0,0063	0,004	0,0201	-3,1896	AP	18-oct-12	0,0228	0,0089	0,1588	-6,9799
AP	17-sep-12	0,0574	0,0246	0,35599	-6,2889	AP	19-oct-12	0,0123	0,0069	0,0528	-4,2928
AP	18-sep-12	0,013	0,0057	0,0789	-6,0693	AP	22-oct-12	0,0405	0,0165	0,269	-6,6457
AP	19-sep-12	13,4506	7,123	63,3101	-4,7027	AP	23-oct-12	0,0228	0,0104	0,1315	-5,768
AP	20-sep-12	0,0456	0,0171	0,3326	-7,282	AP	24-oct-12	0,1744	0,0859	0,9152	-5,24437
AP	21-sep-12	0,132	0,0567	0,8263	-6,2608	AP	25-oct-12	0,00902	0,00782	0,00924	-0,62135
AP	25-sep-12	0,0145	0,0054	0,1055	-7,29	AP	26-oct-12	0,00736	0,005978	0,01119	1,3056
AP	26-sep-12	0,0137	0,0117	0,0159	-0,8233						
AP	27-sep-12	0,0109	0,0053	0,0583	-5,3473						

Anexo 3

Análisis granulométrico de las muestras recolectadas a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en los eventos erosivos de los sitios estudiados.

Tabla A. Análisis granulométrico de las muestras erosionadas a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Altura Colector (cm)	Diámetro de las partículas (µm)											
			0-1	1-2	2-2,5	2,5-10	10-20	20-50	50-74	74-100	100-250	250-500	500-1000	1000-2000
			(%)											
LF	04/09/2007	13,5	1,40	0,87	0,56	6,11	4,76	11,63	11,18	13,48	39,10	6,78	3,08	1,05
		50	1,77	1,19	0,70	7,46	6,08	22,50	20,19	16,53	20,63	2,08	0,54	0,33
		150	1,37	1,37	0,78	8,61	6,46	21,62	17,55	14,77	21,60	3,69	2,02	0,15
LF	01/12/2007	13,5	1,28	0,96	0,61	6,75	4,67	9,14	8,89	12,13	47,37	6,75	0,84	0,58
		50	2,07	2,09	1,07	10,60	6,79	16,83	10,13	10,62	36,82	2,98	0,00	0,00
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LF	22/09/2008	13,5	1,25	0,82	0,54	5,71	3,84	7,13	7,91	12,03	51,97	7,96	0,61	0,21
		50	1,77	1,19	0,68	7,16	5,97	19,82	17,94	16,22	26,89	2,09	0,24	0,02
		150	2,19	1,46	0,79	8,03	7,57	29,30	20,02	13,86	15,91	0,87	0,00	0,00
LF	26/12/2008	13,5	0,00	0,58	0,45	4,87	3,61	8,65	8,06	10,77	48,28	12,00	2,00	0,73
		50	1,80	0,87	0,54	5,53	5,49	21,13	15,81	13,61	28,99	5,11	0,79	0,34
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
LF	28/03/2009	13,5	0,00	0,64	0,49	5,06	3,51	8,05	8,30	11,19	49,57	10,96	2,13	0,10
		50	1,94	1,12	0,67	6,76	5,88	21,45	17,73	15,68	26,11	2,42	0,24	0,00
		150	1,21	1,53	0,65	6,49	5,72	24,86	20,06	15,33	20,14	3,02	1	0
SR	19/01/2006	13,5	1,90	1,51	0,81	7,13	5,31	11,12	12,18	15,25	40,36	4,33	0,13	0,00
		50	2,45	1,67	0,87	7,69	6,02	17,66	19,56	19,01	23,40	1,47	0,20	0,00
		150	2,27	1,65	0,84	7,47	6,23	24,93	24,01	17,27	14,81	0,51	0,00	0,00
SR	03/09/2008	13,5	2,48	1,83	0,97	8,73	6,58	18,01	17,88	16,21	24,20	2,24	0,53	0,33
		50	2,88	2,03	1,05	9,38	7,72	27,01	22,38	14,97	12,20	0,37	0,00	0,00
		150	1,21	1,53	0,65	6,49	5,72	24,86	20,06	15,33	20,14	3,02	1	0

Continuación A3. Tabla A. Análisis granulométrico de las muestras erosionadas a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Altura Colector (cm)	Diámetro de las partículas en µm											
			0-1	1-2	2-2,5	2,5-10	10-20	20-50	50-74	74-100	100-250	250-500	500-1000	1000-2000
			(%)											
SR	10/10/2008	13,5	2,04	0,99	0,55	4,59	3,84	16,72	20,44	20,05	28,73	2,06	0,01	0,00
		50	2,10	0,95	0,53	4,54	4,34	21,04	23,32	19,85	21,54	1,48	0,29	0,00
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
SR	19/11/2009	13,5	2,05	1,41	0,76	6,52	4,82	13,19	13,95	13,87	34,18	7,21	1,62	0,42
		50	2,87	2,34	1,14	9,78	7,99	29,03	22,60	14,12	10,13	0,00	0,00	0,00
		150	1,73	1,94	0,73	7,13	6,2	36,78	23,03	12,88	8,41	1,04	0,15	0
SR	03/12/2009	13,5	2,01	1,44	0,77	6,66	4,96	12,79	12,62	12,89	34,75	8,79	1,23	1,09
		50	2,58	1,90	0,94	8,25	7,74	30,02	23,04	14,54	10,99	0,00	0,00	0,00
		150	2,77	1,80	0,91	7,91	7,65	33,17	23,75	13,23	8,82	0,00	0,00	0,00
VM	14/12/2007	13,5	0,00	0,50	0,42	4,12	3,28	10,48	10,37	16,64	48,99	2,94	0,87	1,38
		50	0,00	0,51	0,41	3,76	3,53	17,68	16,86	18,33	34,43	2,57	1,74	0,19
		150	0,00	0,57	0,45	4,11	4,00	21,44	18,30	16,81	27,32	3,26	3,14	0,60
VM	17/12/2007	13,5	0,00	0,40	0,33	3,16	2,77	11,49	12,88	18,48	47,99	2,52	0,00	0,00
		50	0,00	0,53	0,42	3,98	3,62	18,79	19,15	19,13	32,27	1,76	0,31	0,05
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	31/01/2008	13,5	0,00	0,56	0,43	3,81	2,84	10,19	12,17	18,22	49,17	2,62	0,00	0,00
		50	0,00	0,43	0,34	3,16	2,78	14,22	16,95	19,54	38,92	2,55	0,48	0,61
		150	0,00	2,07	0,54	5,71	3,84	7,13	7,91	12,03	51,97	7,98	0,61	0,21
VM	07/01/2008	13,5	0,00	0,22	0,23	2,06	1,97	10,08	11,47	18,10	53,53	2,33	0,00	0,00
		50	0,00	0,40	0,31	2,81	2,85	17,45	18,34	19,44	34,60	2,29	0,94	0,57
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
VM	13/01/2008	13,5	0,00	0,32	0,27	2,52	2,28	11,11	12,31	17,48	48,46	2,96	1,07	1,20
		50	0,00	0,30	0,24	2,23	2,28	14,02	15,91	18,68	40,72	3,51	2,02	0,09
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Continuación A3. Tabla A. Análisis granulométrico de las muestras erosionadas a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Altura Colector (cm)	Diámetro de las partículas en µm											
			0-1	1-2	2-2,5	2,5-10	10-20	20-50	50-74	74-100	100-250	250-500	500-1000	1000-2000
			(%)											
PC	18/12/2007	13,5	0,00	0,50	0,42	3,92	2,55	7,53	12,11	15,40	41,40	10,52	3,74	1,91
		50	0,00	0,54	0,44	3,96	2,68	10,81	18,11	19,94	33,66	5,57	3,59	0,70
		150	1,55	1,93	0,83	9,06	7,21	27,48	20,09	13,22	14,84	1,61	0,63	1,54
PC	16/01/2008	13,5	0,00	0,57	0,46	4,20	3,05	11,89	15,40	16,44	35,18	7,24	5,43	0,13
		50	0,00	0,58	0,46	4,26	3,55	17,15	20,21	18,56	26,60	4,42	3,09	1,12
		150	1,72	1,19	0,67	6,21	4,56	19,95	22,14	18,01	22,65	2,89	0,00	0,00
PC	14/02/2008	13,5	0,00	0,48	0,40	3,68	2,51	9,36	14,41	16,22	37,96	9,40	4,59	0,99
		50	0,00	0,57	0,46	4,16	2,97	13,67	19,57	18,82	32,51	5,72	1,50	0,02
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PC	04/02/2010	13,5	0,82	1,13	0,52	5,02	3,19	12,84	16,45	15,33	31,66	10,57	2,46	0,00
		50	0,86	1,08	0,47	4,65	2,74	18,45	21,58	18,13	27,27	3,89	0,87	0,00
		150	0,85	0,99	0,40	4,09	1,72	22,00	24,88	18,99	22,52	2,77	0,80	0,00
PC	02/03/2010	13,5	0,62	0,97	0,47	4,54	2,82	9,27	13,56	14,49	38,94	12,27	2,06	0,00
		50	0,73	0,97	0,45	4,35	2,62	12,02	17,30	16,78	33,54	8,84	2,39	0,00
		150	0,76	1,00	0,45	4,31	2,21	13,44	21,27	19,74	32,32	3,51	0,98	0,00
RM	14/10/2008	13,5	0,00	0,17	0,20	1,95	1,64	7,37	11,62	14,05	46,14	12,65	3,66	0,54
		50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RM	09/11/2008	13,5	0,00	0,18	0,21	1,93	1,41	5,91	10,96	13,92	47,52	13,68	3,09	1,16
		50	0,00	0,17	0,21	2,23	1,65	2,87	5,45	11,94	51,77	14,32	5,56	3,82
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RM	23/01/2009	13,5	0,00	0,17	0,21	2,08	1,54	4,62	7,71	10,15	38,21	20,50	12,45	2,36
		50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Continuación A3. Tabla A. Análisis granulométrico de las muestras erosionadas a los 13,5, 50 y 150 cm de altura en los sitios de Los Frentones (LF), Santa Rosa (SR), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Altura Colector (cm)	Diámetro de las partículas en μm											
			0-1	1-2	2-2,5	2,5-10	10-20	20-50	50-74	74-100	100-250	250-500	500-1000	1000-2000
			(%)											
AP	17/10/2011	13,5	0,00	0,31	0,22	2,04	1,57	5,45	11,38	14,67	48,16	14,30	1,89	0,00
		50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		150	0,93	1,54	0,70	6,45	3,90	17,18	18,31	15,23	27,06	4,93	0,86	2,92
AP	04/11/2011	13,5	0,00	0,02	0,13	1,11	0,94	1,16	6,03	11,33	55,91	21,90	1,46	0,00
		50	0,85	1,35	0,69	6,14	3,61	7,06	11,24	13,10	36,58	12,52	5,67	1,18
		150	1,35	2,03	0,96	8,54	5,03	13,72	14,99	14,23	34,81	4,34	0,00	0,00
AP	11/11/2011	13,5	0,00	0,28	0,22	1,95	1,33	4,03	8,28	12,21	49,68	17,91	3,97	0,14
		50	1,08	1,65	0,82	7,30	3,88	11,11	13,30	12,94	30,77	14,17	3,00	0,00
		150	1,04	1,33	0,61	5,85	2,99	20,90	20,12	15,67	23,99	6,62	0,88	0,00
AP	14/11/2011	13,5	0,93	1,51	0,77	6,82	3,79	7,21	8,28	10,33	38,10	15,85	4,41	2,00
		50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
AP	19/09/2012	13,5	2,66	4,48	2,18	15,49	4,87	5,46	7,02	9,52	36,39	10,92	0,99	0
		50	2,52	4,38	2,11	14,76	4,61	6,13	5,63	5,85	17,47	13,49	16,41	6,65
		150	1,71	2,38	1,13	9,88	5,07	16,12	15,53	13,28	23,19	6,74	4,88	0,08

n.d. No determinado por falta de material para el análisis.

Anexo 4

Fracciones texturales en las muestras sin dispersar sedimentadas a lo largo del túnel de viento

Tabla A. Fracciones texturales en las muestras sin dispersar sedimentadas a lo largo del túnel de viento, para los suelos de, Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Distancia en el túnel (cm)	Tamaño de partícula (µm)									
	0 - 1,0	1,0 - 2,5	2,5 - 10	10,0 - 20	20 - 50	50 - 74	74 - 100	100 - 250	250 - 500	500 - 1000
Santa Rosa	(%)									
0 a 130	0,8	3,13	3,19	9,1	9,1	8,22	10,3	40,32	17,44	6,19
130 a 260	0	0,62	2,46	2,04	4,8	3,46	8,36	73,02	5,24	0
260 a 390	0	0,69	2,39	1,8	4,23	9,44	29,25	51,01	1,2	0
390 a 520	0	0,94	2,67	1,99	8,37	27,49	35,92	22,61	0	0
520 a 650	0,51	1	2,75	1,91	15,59	37,76	29,16	11,31	0	0
650 a 800	0,69	1,26	3,44	2,89	28,03	39,02	19,23	5,45	0	0
Los Frentones										
0 a 130	0	0,28	1,82	1,91	4,22	1,9	1,92	39,94	43,67	3,89
130 a 260	0	0,34	1,9	2,13	5,37	2,3	4,3	76,54	7,11	0
260 a 390	0	0,36	1,78	2,02	5,23	4,55	25,21	59,54	1,32	0
390 a 520	0	0,49	1,91	1,84	5,27	20,25	36,82	31,6	1,8	0
520 a 650	0	0	1,64	2,08	10,38	35,65	34,03	16,22	0	0
650 a 800	0	0,77	2,1	2,18	18,33	40,59	25,29	10,72	0	0
Anguil										
0 a 130	0	0,75	2,79	2,89	8,52	7,09	9,73	25,94	9,29	27,65
130 a 260	0	0,42	1,74	1,26	2,29	1,43	10,71	76,98	3,68	1,04
260 a 390	0	0,49	1,84	1,29	2,81	8,01	27,23	56,74	1,59	0
390 a 520	0	0,75	2,07	1,49	11,66	33,88	34,14	16,02	0	0
520 a 650	0	0,69	1,95	1,38	11,2	32,96	34,08	17,75	0	0
650 a 800	0	0,81	2,27	2,05	20,98	38,34	25,88	9,66	0	0

Continuación A4. Tabla A. Fracciones texturales en las muestras sin dispersar sedimentadas a lo largo del túnel de viento, para los suelos de, Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Distancia en el túnel (cm)	Tamaño de partícula (µm)									
	0 - 1,0	1,0 - 2,5	2,5 - 10	10,0 - 20	20 - 50	50 - 74	74 - 100	100 - 250	250 - 500	500 - 1000
Villa Mercedes										
					(%)					
0 a 130	0	0	0,37	1,02	3,03	2,11	3,12	39,24	31,34	14,56
130 a 260	0	0	0	0	0	0,03	4,97	84,67	9,94	0,38
260 a 390	0	0	0	0	0	3,11	24,1	69,78	2,99	0,02
390 a 520	0	0,3	0,97	0,64	2,78	17,08	37,07	39,55	1,6	0
520 a 650	0	0,41	1,15	0,7	7,42	28,73	33,36	26,25	1,97	0
650 a 800	0	0,51	1,24	1,05	17,99	39,8	27,49	11,93	0	0
Abra Pampa										
0 a 130	0	0,29	1,46	1,17	3,51	4,08	4,2	17,88	27,16	33,65
130 a 260	0	0,45	2,3	2,02	5,31	3,65	5,93	72,63	7,75	0
260 a 390	0	0,57	2,53	2,03	5,07	5,41	24,18	59,02	1,18	0
390 a 520	0	0,95	3,65	2,32	4,78	19,45	35,87	31,49	1,51	0
520 a 650	0	0,81	2,62	1,78	8,24	33,54	35,5	17,52	0	0
650 a 800	0	0,89	2,46	1,84	16,3	41,71	26,66	10,13	0	0
Pilcaniyeu										
0 a 130	0	0,11	1,39	1,13	2,58	1,83	1,85	15,9	41,44	24,09
130 a 260	0	0,3	1,65	1,27	2,49	1,79	2,45	69,37	15,75	3,99
260 a 390	0	0,4	1,83	1,41	3,11	3,32	19,4	67,82	1,88	0,61
390 a 520	0	0,47	1,8	1,26	3,15	13,91	34,18	43,39	1,85	0
520 a 650	0	0	1,08	1,01	5,93	27,22	37,1	27,65	0	0
650 a 800	0	0,65	2	1,52	12,44	37,66	31,66	14,07	0	0

Continuación A4. Tabla A. Fracciones texturales en las muestras sin dispersar sedimentadas a lo largo del túnel de viento, para los suelos de, Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Anguil (AN), Villa Mercedes (VM), Abra Pampa (AP), Pilcaniyeu (PC), Río Mayo (RM) y Potrok Aike (PA).

Distancia en el túnel (cm)	Tamaño de partícula (µm)									
	1,0 - 2,5	2,5 - 10	10,0 - 20	20 - 50	50 - 74	74 - 100	100 - 250	250 - 500	500 - 1000	
Río Mayo										
					(%)					
0 a 130	0	0,02	0,63	0,38	0,5	0,23	0,43	26	52,42	17,65
130 a 260	0	0,06	0,33	0,22	0,44	0,2	4,09	89,31	5,34	0,02
260 a 390	0	0	0	0	0	3,38	26,57	69,28	0,77	0
390 a 520	0	0	0	0	0,07	17,75	41,39	38,98	1,81	0
520 a 650	0	0,16	0,75	0,46	4,33	31,1	40,26	22,93	0	0
650 a 800	0	0,29	0,9	0,75	11,41	36,66	32,82	15,16	0	0
Potrok Aike										
0 a 130	0	0	0,65	0,95	3,29	3,13	4,6	32,66	40,27	12,23
130 a 260	0	0	0,48	0,66	1,99	1,99	3,32	69,66	16,73	4,65
260 a 390	0	0	0,81	0,78	2,5	2,6	16,57	70,08	4,21	1,63
390 a 520	0	0	0,84	0,65	2,22	9,31	28,13	51,59	4,12	2,7
520 a 650	0	0,12	0,85	0,49	2,97	20,16	34,5	38,4	2,51	0
650 a 800	0	0,35	1,05	0,67	7,48	30,04	33,81	24,67	1,93	0

Anexo 5

Elementos totales en muestras del suelo original y en el material erosionado

Tabla A. Elementos totales (C, N, P, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg, K y As) en las muestras compuestas de los 2 cm superficiales de los suelos de Santa Rosa, Los Frentones, Villa Mercedes, Abra Pampa, Pilcaniyeu, Río Mayo y Potrok Aike.

Sitio	C	N	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg	K	As
	mg kg ⁻¹ de suelo											
Santa Rosa	13850,0	1368,2	295,2	853,2	20285,4	369,4	22,3	39,7	349,9	3557,3	4188,2	<100
Los Frentones	4220,0	500,1	350,3	539,8	6756,1	162,6	16,9	16,2	115,0	2118,4	6262,7	<100
Villa Mercedes	15310,0	2073,0	385,5	420,4	13116,2	185,4	19,2	22,9	379,7	2544,4	456,9	<100
Abra Pampa	2810,0	446,4	279,5	124,5	17418,6	198,8	10,6	40,2	94,0	2835,1	3304,6	<100
Pilcaniyeu	3580,0	412,9	215,0	628,8	30825,9	427,5	34,9	460,6	281,0	6093,2	1436,6	<100
Río Mayo	3130,0	375,5	432,0	381,5	30815,4	463,0	24,1	0,0	653,7	4425,6	2377,2	<100
Potrok Aike	25240,0	609,5	597,3	566,9	23977,9	1061,9	23,3	49,6	216,1	2853,6	4166,1	<100

Tabla B. Elementos totales (C, N, P, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg, K y As) en las muestras erosionadas a los 13,5, 50 y 150 cm de altura, en los sitios de Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Altura Colector (cm)	C	N	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg	K	As
			mg kg ⁻¹ de suelo											
SR	19/01/2006	13,5	5410,0	500,0	227,9	405,6	25398,2	312,3	35,9	33,2	737,6	4268,2	5206,4	<100
		50	9250,0	930,0	320,4	749,9	24955,8	337,7	16,3	42,6	927,9	471,1	6223,8	<100
		150	12760,0	1130,0	368,5	913,9	26283,2	375,8	29,4	102,2	914,6	4921,4	5904,1	<100
SR	03/09/2008	13,5	11410,0	1100,0	329,5	497,9	22743,4	358,9	22,9	39,5	861,5	4491,2	5816,9	<100
		50	15050,0	1320,0	382,1	199,3	26725,7	430,9	22,9	114,7	1712,4	5149,8	6572,7	<100
		150	18540,0	1740,0	410,4	418,8	26902,7	395,8	45,8	179,3	1271,7	5774,8	7970,9	<100
SR	10/10/2008	13,5	6900,0	610,0	262,9	110,8	20088,5	286,9	29,4	83,4	865,9	3869,9	4799,4	<100
		50	10020,0	950,0	306,5	118,9	24955,8	346,2	29,4	164,9	2110,6	5123,2	6514,5	<100
		150	16240,0	1540,0	396,7	266,3	27256,2	324,9	149,9	53,4	803,2	198,4	11067,8	<100
SR	19/11/2009	13,5	5450,0	412,5	58,1	124,4	19275,1	282,3	28,9	37,0	337,3	3215,5	3291,8	<100
		50	9420,0	996,1	564,0	387,4	22434,6	385,1	28,5	92,1	433,6	4010,2	4081,6	<100
		150	11690,0	1069,4	959,1	679,9	24045,9	438,5	28,8	173,1	448,3	4521,3	4546,4	<100

Continuación A5. Tabla B. Elementos totales (C, N, P, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg, K y As) en las muestras erosionadas a los 13.5, 50 y 150 cm de altura, en los sitios de Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Altura Colector	C	N	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg	K	As
		(cm)	mg kg ⁻¹ de suelo											
SR	03/12/2009	13,5	4630,0	364,9	105,9	112,0	20906,3	292,7	28,7	30,1	330,9	3220,0	3318,2	<100
		50	9460,0	1056,9	1032,7	627,9	23936,1	376,5	34,9	63,2	410,7	3976,5	4102,1	<100
		150	11300,0	958,9	332,1	436,2	24007,6	415,7	28,8	133,0	438,7	4269,9	4448,2	<100
LF	04/09/2007	13,5	11460,0	1060,0	357,0	189,4	12566,4	189,4	22,9	52,0	166,8	1177,4	4625,0	<100
		50	33050,0	2640,0	824,0	311,4	22069,0	311,4	62,1	354,2	1497,9	5299,5	9572,7	<100
		150	30150,0	2470,0	1095,0	299,6	19051,7	299,6	153,0	636,4	865,0	4840,7	8059,3	<100
LF	01/12/2007	13,5	6940,0	680,0	368,0	174,1	13017,2	174,1	16,7	101,3	162,4	3412,9	4973,3	<100
		50	8290,0	810,0	313,0	189,8	15172,4	189,8	31,8	464,9	141,4	3222,2	5240,4	<100
		150	21030,0	2160,0	360,0	262,4	18212,7	262,4	53,4	686,2	37,1	2544,0	8289,1	<100
LF	22/09/2008	13,5	3790,0	433,2	184,7	248,4	7338,5	152,8	28,4	44,7	179,2	2145,2	3778,5	<100
		50	9620,0	944,1	521,9	438,7	13494,1	274,2	16,8	807,1	279,6	3677,7	10955,7	<100
		150	14780,0	1130,8	530,9	677,9	15497,9	332,2	22,8	1404,1	412,9	4179,1	9153,7	<100
LF	07/10/2008	13,5	3520,0	706,1	289,1	124,2	8523,5	171,8	10,7	198,0	115,8	2103,5	9810,2	<100
		50	9730,0	1214,1	483,1	263,5	14156,1	295,3	10,7	1894,2	221,2	3530,5	16423,1	<100
		150	12730,0	1166,7	605,0	474,8	15961,7	313,3	23,5	3673,1	256,2	4014,5	8537,6	<100
LF	26/12/2008	13,5	4330,0	352,8	221,2	141,1	7641,3	163,2	10,7	683,6	115,5	2180,3	10196,5	<100
		50	12060,0	1242,9	426,1	394,8	12677,6	258,8	23,1	4171,2	222,2	3311,5	7180,3	<100
		150	13680,0	1405,0	550,1	508,5	13589,6	288,4	23,2	5602,8	223,2	3781,2	8161,8	<100
VM	14/12/2007	13,5	7730,0	760,0	403,8	204,7	18189,7	229,0	24,2	22,9	778,5	3588,1	4023,7	<100
		50	16190,0	1540,0	462,7	83,3	19482,8	260,4	24,2	508,8	694,1	4144,8	4646,9	<100
		150	17980,0	1990,0	519	124,2	19051,7	268,2	31,8	888,1	808,0	4155,2	4795,3	<100
VM	17/12/2007	13,5	10390,0	990,0	413,4	176,9	18189,7	225,1	84,8	207,8	394,5	3665,5	3786,4	<100
		50	16110,0	1500,0	529,4	46,6	18620,7	264,3	24,2	377,1	9683,5	4273,7	5329,4	<100
		150	16380,0	1940,0	325,4	74,4	17337,5	276,4	33,2	1156,7	7351,6	4004,0	5707,8	<100

Continuación A5. Tabla B. Elementos totales (C, N, P, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg, K y As) en las muestras erosionadas a los 13.5, 50 y 150 cm de altura, en los sitios de Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Altura Colector	C	N	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg	K	As
		(cm)	mg kg ⁻¹ de suelo											
VM	31/01/2008	13,5	10110,0	785,1	390,5	843,6	14212,9	212,3	39,8	579,0	493,4	2978,9	556,0	<100
		50	14060,0	1039,5	419,9	649,0	18048,3	268,4	26,2	1642,1	623,6	3538,5	667,0	<100
		150	19880,0	1814,8	481,4	982,0	16163,2	245,2	19,0	2203,2	558,5	3375,4	650,1	<100
VM	07/01/2008	13,5	5270,0	648,6	126,9	115,6	13896,4	196,8	26,1	62,8	464,8	2785,7	493,4	<100
		50	11790,0	1324,3	710,1	511,1	14412,9	232,8	26,2	210,9	449,2	3164,2	584,2	<100
		150	17080,0	2097,3	519,3	469,4	15301,5	250,2	26,2	556,5	420,0	3207,7	590,5	<100
VM	13/01/2008	13,5	7130,0	759,0	126,3	106,0	14997,0	208,4	26,4	175,6	439,8	2881,5	493,4	<100
		50	10950,0	1561,1	1228,9	748,6	17044,3	271,1	26,1	447,6	564,6	3339,7	649,5	<100
		150	23180,0	2400,9	584,4	491,9	16288,7	264,7	33,4	903,6	547,3	3436,9	600,5	<100
PC	18/12/2007	13,5	23570,0	1960,0	439,7	145,9	29823,0	409,7	153,6	299,7	5429,2	6620,8	2561,0	<100
		50	27200,0	2040,0	465,8	166,9	15663,7	460,6	127,5	2307,2	4854,0	6567,7	3113,4	<100
		150	30150,0	2440,0	454,9	98,2	60531,0	412,7	281,0	1746,7	3778,8	6550,2	3552,3	<100
PC	16/01/2008	13,5	26710,0	1920,0	370,9	82	27610,6	418,2	81,7	2119,1	4986,7	6498,7	2648,3	<100
		50	40010,0	2110,0	420	165,1	29823,0	460,6	101,3	5912,2	4234,5	6450,9	3084,3	<100
		150	49280,0	2360,0	448,2	166,9	34247,8	477,5	297,4	9203,8	4146,0	6684,5	3200,6	<100
PC	14/02/2008	13,5	19170,0	1363,7	468,8	365,1	24553,1	408,3	46,9	2131,2	2942,0	5534,9	1979,2	<100
		50	24690,0	1789,3	532,6	439,3	26711,6	435,2	167,0	6126,9	2207,2	5378,8	2088,1	<100
		150	35970,0	2985,3	687,3	620,8	13596,5	206,0	22,6	43,7	551,6	2711,3	2670,7	<100
PC	04/02/2010	13,5	17870,0	1277,0	410,2	204,5	15591,7	538,1	262,3	272,7	6663,2	5299,5	1835,8	<100
		50	24020,0	1861,9	480,5	287,1	17612,5	619,7	326,0	346,6	7633,9	4840,7	2301,9	<100
		150	22950,0	2454,7	486,2	346,4	12954,9	459,5	261,5	274,9	6446,2	3412,9	2048,3	<100
PC	02/03/2010	13,5	15770,0	1554,0	390,5	231,2	16856,4	557,4	266,5	863,9	7507,4	3222,2	1865,2	<100
		50	17550,0	1644,6	414,2	286,5	15550,9	373,3	265,0	1501,2	7348,9	2544,0	2296,4	<100
		150	12750,0	1299,6	391,4	303,8	15022,6	493,0	326,9	1509,0	7370,4	3588,1	2086,4	<100

Continuación A5. Tabla B. Elementos totales (C, N, P, S, Fe, Mn, Cu, Zn, Ca, Mg, K y As) en las muestras erosionadas a los 13.5, 50 y 150 cm de altura, en los sitios de Santa Rosa (SR), Los Frentones (LF), Villa Mercedes (VM), Pilcaniyeu (PC), Río mayo (RM), Potrok Aike (PA) y Abra Pampa (AP).

Sitio	Fecha	Altura Colector	C	N	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg	K	As
		(cm)	mg kg ⁻¹ de suelo											
RM	14/10/2008	13,5	7160,0	776,3	457,0	310,2	44223,8	535,3	31,2	1506,5	646,5	4898,7	2612,8	<100
		50	28840,0	2300,9	543,1	193,1	33511,1	522,1	105,9	1437,3	915,3	4966,8	2867,0	<100
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	32883,3	533,4	225,7	2003,2	1154,8	4830,7	3125,0	<100
RM	09/11/2008	13,5	7120,0	927,3	160,6	77,2	35344,1	499,2	17,5	573,3	909,5	5093,0	2639,0	<100
		50	8930,0	1004,9	1770,1	530,4	35428,0	504,7	118,5	2546,9	718,0	4912,8	2420,4	<100
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
RM	23/01/2009	13,5	10990,0	1211,7	317,2	127,5	33901,5	497,4	70,9	8312,2	666,8	4703,4	2517,9	<100
		50	12460,0	1539,3	1411,5	536,3	39583,9	524,2	734,4	19282,9	717,0	4500,8	2459,7	<100
		150	14090,0	1516,4	481,3	264,2	49889,7	572,9	200,6	4651,5	436,9	5009,6	2323,1	<100
PA	26/01/2010	13,5	103500,0	7856,9	1828,1	993,2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	(*)	50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
AP	17/10/2011	13,5	23500	1870	75,3	255,9	13957,7	275,1	80,4	557,4	3802,3	2989,1	3680,2	n.d.
		50	43100	2720	485,1	381,7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
AP	04/11/2011	13,5	14300	1340	379,6	226,3	11371,4	183,1	100,9	305,2	2294,3	2661,9	3216,5	n.d.
		50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
AP	11/11/2011	13,5	12300	2560	338,5	124,4	13371,5	220,3	101,5	88,7	2377,0	2534,8	3129,5	n.d.
		50	16700	1720	89,5	48,6	16128,7	277,9	122,5	530,4	2923,0	3341,5	4114,4	n.d.
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
AP	14/11/2011	13,5	17700	2120	445,2	175,4	12931,7	223,1	111,4	312,7	2524,6	2757,9	3369,7	n.d.
		50	33800	3350	7732,3	356,9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
		150	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d. No determinado por falta de material para el análisis.

(*) Para poder efectuar el análisis se formó una muestra compuesta con lo recolectado los días 22, 24 y 26/01/2010.

Anexo 6

Parámetros de regresiones simples y múltiples entre la concentración de elementos y parámetros climáticos.

Tabla A. Regresiones múltiples entre las concentraciones de elementos totales en el material erosionado a distintas alturas y diferentes sitios, y los parámetros climáticos duración de las tormentas (Dur) y velocidad del viento promedio (Vp), velocidad de viento media en el período de excedencia (VmPE) o velocidad máxima en período de excedencia (VMaPE).

Sitio	Altura muestreo	Ecuación de la regresión múltiple	Ajuste (% de explicación del modelo)
Tc (*)	13,5	$C = 8,2273 - 9,17115 * Dur + 0,357243 * Vp$	$P < 0,05 (72,8)$
Tc	50	$C = -111,468 + 0,00100234 * Dur + 5,4131 * VmPE$	$P < 0,10 (54,9)$
LF+VM	50	$C = -2,58563 + 0,00292649 * Dur + 1,75743 * Vp$	$P < 0,05 (80,3)$
LF+VM	50	$C = -13,0177 + 0,0089343 * Dur + 0,995626 * VmPE$	$P < 0,05 (80,0)$
LF+VM	50	$C = -19,239 + 0,00591157 * Dur + 1,14072 * VMaPE$	$P < 0,05 (83,1)$
LF	13,5	$C = -4,77192 - 0,0073875 * Dur + 1,68911 * Vp$	$P < 0,05 (96,5)$
Tc	13,5	$N = 22,8179 - 3,27028 * Dur + 0,151987 * Vp$	$P < 0,05 (65,3)$
Tc	13,5	$N = 21,6215 + 0,0587261 * Dur + 1,89257 * VmPE$	$P < 0,05 (61,0)$
LF+VM	13,5	$N = 0,243828 + 0,000213279 * Dur + 0,0316378 * Vp$	$P < 0,05 (86,6)$
LF+VM	13,5	$N = 0,062826 + 0,000320579 * Dur + 0,0176193 * VmPE$	$P < 0,05 (88,0)$
LF+VM	13,5	$N = -0,00932758 + 0,000267386 * Dur + 0,0186666 * VMaPE$	$P < 0,05 (86,7)$
LF+VM	50	$N = 0,175555 + 0,000247819 * Dur + 0,118936 * Vp$	$P < 0,05 (82,1)$
LF+VM	50	$N = -0,579439 + 0,000660564 * Dur + 0,0695725 * VmPE$	$P < 0,05 (84,6)$
LF+VM	50	$N = -1,0038 + 0,000449424 * Dur + 0,0792955 * VMaPE$	$P < 0,05 (87,2)$
LF	150	$N = -0,649858 - 0,00210074 * Dur + 0,395585 * Vp$	$P < 0,01 (99,1)$
LF+VM	150	$P = -0,573453 + 0,0000333933 * Dur + 0,0442039 * VMaPE$	$P < 0,05 (84,7)$
Tc	13,5	$K = -4,1523 - 0,000150414 * Dur + 0,305206 * VmPE$	$p < 0,01 (84,7)$
Tc	50	$K = -10,0699 - 0,000199304 * Dur + 0,56575 * VmPE$	$p < 0,05 (89,1)$
LF+VM	150	$K = 7,69695 - 0,00196779 * Dur + 0,199553 * Vp$	$p < 0,05 (82,6)$
LF+VM	150	$K = 5,96658 - 0,00121697 * Dur + 0,137479 * VmPE$	$p < 0,01 (90,3)$
LF+VM	150	$K = 5,5893 - 0,00163055 * Dur + 0,138209 * VMaPE$	$p < 0,05 (86,1)$
LF	50	$K = 25,1379 + 0,0245439 * Dur - 3,28701 * Vp$	$p < 0,05 (95,0)$
SR	150	$K = 28,2202 + 0,00213684 * Dur - 0,91269 * VmPE$	$p < 0,05 (98,2)$
Tc	13,5	$Ca = -1,77945 + 0,000235104 * Dur + 0,291919 * Vp$	$p < 0,05 (68,6)$
Tc	13,5	$Ca = -16,6354 + 0,000436011 * Dur + 0,718404 * VmPE$	$p < 0,01 (91,1)$
Tc	13,5	$Ca = -1,7213 + 0,000516131 * Dur + 0,0796817 * VMaPE$	$p < 0,05 (61,7)$
Tc	50	$Ca = -22,8386 + 0,000245142 * Dur + 0,995798 * VmPE$	$p < 0,01 (95,1)$
Tc	150	$Ca = -15,6604 + 0,000337443 * Dur + 0,499823 * VMaPE$	$p < 0,05 (96,0)$
LF+VM	50	$Ca = -0,368676 + 0,00032227 * Dur + 0,0746762 * Vp$	$p < 0,05 (81,0)$
LF+VM	50	$Ca = -0,835816 + 0,000580554 * Dur + 0,0433739 * VmPE$	$p < 0,05 (82,1)$
LF+VM	50	$Ca = -1,08732 + 0,000449025 * Dur + 0,0489125 * VMaPE$	$p < 0,05 (83,0)$
Tc	13,5	$Mg = 1,44369 + 0,000369808 * Dur + 0,134454 * Vp$	$p < 0,05 (61,0)$
Tc	13,5	$Mg = 14,0959 + 0,000602205 * Dur - 0,479748 * VmPE$	$p < 0,01 (74,7)$
Tc	13,5	$Mg = 1,52856 + 0,000500323 * Dur + 0,034741 * VMaPE$	$p < 0,05 (59,3)$
Tc	50	$Mg = 2,36327 + 0,000195919 * Dur + 0,157863 * Vp$	$p < 0,05 (86,1)$
Tc	50	$Mg = 5,91704 + 0,00042279 * Dur - 0,101613 * VmPE$	$p < 0,05 (82,9)$
Tc	50	$Mg = -2,31164 + 0,000313834 * Dur + 0,19566 * VMaPE$	$p < 0,01 (96,4)$
Tc	150	$Mg = -35,0347 - 0,000578999 * Dur + 1,76964 * VmPE$	$p < 0,05 (98,5)$
LF+VM	50	$Mg = 1,87362 + 0,000813686 * Dur + 0,0651372 * VmPE$	$p < 0,05 (78,1)$
LF+VM	50	$Mg = 1,43995 + 0,000615718 * Dur + 0,0756972 * VMaPE$	$p < 0,05 (80,9)$
SR	50	$Mg = 32,4358 - 0,0006877 * Dur - 0,723933 * VMaPE$	$p < 0,05 (97,8)$

Continuación A6. Tabla A. Regresiones múltiples entre las concentraciones de elementos totales en el material erosionado a distintas alturas y diferentes sitios, y los parámetros climáticos duración de las tormentas (Dur) y velocidad del viento promedio (Vp), velocidad de viento media en el período de excedencia (VMaPE) o velocidad máxima en período de excedencia (VMaPE).

Sitio	Altura muestreo	Ecuación de la regresión múltiple	Ajuste (% de explicación del modelo)
LF+VM	13,5	Fe = 13,2061 + 0,00412728*Dur - 0,247826*VmPE	p< 0,05 (81,6)
LF+VM	13,5	Fe = 13,8292 + 0,00487236*Dur - 0,246857*VMaPE	p< 0,05 (79,8)
LF+VM	50	Fe = 10,0821 + 0,00282897*Dur + 0,447627*Vp	p< 0,05 (88,7)
LF+VM	50	Fe = 8,42603 + 0,00423332*Dur + 0,208796*VmPE	p< 0,05 (83,0)
LF+VM	50	Fe = 6,44026 + 0,00359403*Dur + 0,266512*VMaPE	p< 0,05 (86,8)
LF	50	Fe = -20,6072 - 0,00710741*Dur + 1,4935*VMaPE	p< 0,05 (97,1)
Tc	150	Mn = -2,46986 - 0,0000986216*Dur + 0,139867*VmPE	p< 0,01 (99,3)
LF+VM	13,5	Mn = 0,168663 + 0,0000376428*Dur - 0,00208616*Vp	p< 0,01 (91,7)
LF+VM	13,5	Mn = 0,189132 + 0,0000294945*Dur - 0,00154368*VmPE	p< 0,01 (94,4)
LF+VM	13,5	Mn = 0,193154 + 0,0000341367*Dur - 0,00154329*VMaPE	p< 0,01 (93,7)
SR	150	Mn = 0,407644 - 0,0000369561*Dur + 0,00191096*Vp	p< 0,05 (98,8)
SR	150	Mn = 0,58308 - 0,0000399275*Dur - 0,00353735*VMaPE	p< 0,05 (96,5)
Tc	150	Cu = -0,119672 + 0,00000963785*Dur + 0,0099291*VMaPE	p< 0,05 (97,8)
LF+VM	150	Cu = -0,0547335 - 0,00000540017*Dur + 0,0128533*Vp	p< 0,05 (89,8)
LF+VM	150	Cu = -0,12288 + 0,0000375142*Dur + 0,00691696*VmPE	p< 0,05 (81,5)
LF+VM	150	Cu = -0,16484 + 0,0000165242*Dur + 0,00787437*VMaPE	p< 0,05 (85,5)
LF	50	Cu = -0,269002 - 0,0000851214*Dur + 0,0128719*VMaPE	p< 0,05 (98,0)
LF	150	Cu = -0,598008 - 0,00015499*Dur + 0,0275612*VMaPE	p< 0,05 (99,0)
SR	150	Cu = -0,0424013 + 0,0000389667*Dur + 0,00228047*Vp	p< 0,01 (99,4)
SR	150	Cu = 0,144711 + 0,0000362824*Dur - 0,00367236*VMaPE	p< 0,05 (96,2)
SR	13,5	Zn = -0,0000255036 + 0,000015502*Dur + 0,00119016*Vp	p< 0,05 (98,7)
SR	150	Zn = 0,933231 - 0,0000365642*Dur - 0,0280074*VmPE	p< 0,01 (99,7)

Tabla B. Coeficientes de las ecuaciones de regresión lineal simple entre concentraciones de elementos totales en el material erosionado a distintas alturas y parámetros climáticos.

Elemento	Sitio	Altura muestreo cm	Parámetro climático	a	b	N	R
C	TS	13.5	Dur (*)	5.011	0.002	22	0.81 (p<0.001)
C	TS	50.0	Dur	11.960	0.003	21	0.58 (p<0.01)
C	TS	150.0	Dur	12.460	0.003	16	0.78 (p<0.001)
C	Tc	13.5	Vp	-5.936	3.434	10	0.80 (p<0.01)
C	Tc	13.5	VmPE	-80.87	3.937	10	0.77 (p<0.01)
C	Tc	50.0	VmPE	-119.5	5.888	9	0.71 (p<0.05)
C	LF+VM	50.0	Vp	-2.1647	2.0339	7	0.86 (p<0.05)
C	LF+VM	150.0	Vp	5.8136	1.4558	7	0.88 (p<0.01)
N	TS	13.5	Dur	0.7324	0.0002	22	0.52(p<0.05)
N	TS	150.0	Dur	1.3523	0.0002	16	0.68(p<0.01)
N	Tc	13.5	VmPE	-6.3608	0.3229	10	0.78 (p<0.01)
N	LF+VM	50.0	Vp	0.2112	0.1423	7	0.85 (p<0.05)
P	LF+VM	150.0	Vp	0.0840	0.0575	7	0.82 (p<0.05)
P	LF+VM	150.0	VMaPE	-0.5461	0.0444	7	0.91 (p<0.01)
P	LF+VM	13.5	Dur	0.2347	0.0000	7	0.82 (p<0.05)
Ca	TS	13.5	Dur	0.0213	0.0006	22	0.84 (p<0.001)
Ca	TS	50.0	Dur	0.2142	0.0005	21	0.85 (p<0.001)
Ca	TS	150.0	Dur	0.1016	0.0004	16	0.80 (p<0.001)
Ca	TS	TA	Dur	0.1248	0.0005	56	0.84 (p<0.001)
Ca	Tc	13.5	Vp	-2.756	0.440	10	0.80 (p<0.01)
Ca	Tc	50.0	Vp	-2.175	0.358	7	0.75 (p<0.05)
Ca	Tc	150.0	Vp	-3.809	0.426	5	0.88 (p<0.05)
Ca	Tc	150.0	VMaPE	-18.19	0.632	5	0.90 (p<0.05)
Ca	Tc	13.5	VmPE	-20.46	0.937	10	0.76 (p<0.01)
Ca	Tc	50.0	VmPE	-28.11	1.253	7	0.92 (p<0.01)
Ca	Tc	150.0	VmPE	-29.10	1.2770	5	0.97 (p<0.01)
Ca	LF+VM	50.0	Vp	-0.3223	0.1051	7	0.76 (p<0.05)
Ca	LF+VM	13.5	VmPE	0.8655	-0.0301	7	0.77 (p<0.05)
Mg	TS	13.5	Dur	2.5545	0.0005	22	0.75 (p<0.001)
Mg	TS	50.0	Dur	3.3815	0.0004	19	0.69 (p<0.001)
Mg	Tc	50.0	Vp	-0.093	0.3670	10	0.72 (p<0.05)
Mg	Tc	150.0	Vp	1.527	0.2860	7	0.91 (p<0.01)
Mg	LF+VM	13.5	VMaPE	6.2124	-0.1433	7	0.77 (p<0.05)
Mg	LF+VM	13.5	VmPE	5.1949	-0.1312	7	0.86 (p<0.05)
Mg	LF+VM	50.0	Vp	2.6435	0.1515	7	0.76 (p<0.05)
K	TS	13.5	Dur	5.2396	-0.0005	22	0.46 (p<0.05)
K	TS	50.0	Dur	7.2765	-0.0007	19	0.46 (p<0.05)
K	TS	150.0	Dur	7.3237	-0.0006	17	0.51 (p<0.05)
K	Tc	150.0	VMaPE	-2.375	0.167	5	0.89 (p<0.05)
K	LF+VM	150.0	VmPE	3.6470	0.197	5	0.76 (p<0.05)

(*)a y b coeficientes de regresión (concentración de un nutriente = a + b parámetro climático), N números de datos, r coeficiente de determinación de la regresión y significancia, Dur duración de la tormenta, Vp velocidad promedio, VmPE velocidad media en período de excedencia, VMaPE velocidad máxima en período de excedencia TS todos los sitios, TA todas las alturas, Tc suelos terciarios, LF Los Frentones, VM Villa Mercedes.

Continuación A6. Tabla B. Coeficientes de las ecuaciones de regresión lineal simple entre concentraciones de elementos totales en el material erosionado a distintas alturas y parámetros climáticos.

Elemento	Sitio	Altura muestreo cm	Parámetro climático	a	b	N	R
Fe	TS	13.5	Dur	15.349	0.00215	22	0.45 (p<0.05)
Fe	TS	150	Dur	18.286	0.0033	17	0.59 (p<0.05)
Fe	Ls+As	50.0	Vp	13.273	0.5196	12	0.72 (p<0.01)
Fe	Ls+As	150.0	Vp	13.906	0.5257	12	0.76 (p<0.001)
Fe	Tc	13.5	VMaPE	1.2653	0.4865	12	0.63 (p<0.05)
Fe	Tc	50.0	VMaPE	4.7692	0.4940	12	0.79 (p<0.01)
Fe	Tc	150.0	VMaPE	5.6101	0.4897	12	0.63 (p<0.05)
Mn	TS	13.5	Dur	0.2275	0.00003	22	0.54 (p<0.01)
Mn	TS	50.0	Dur	0.3080	0.00003	19	0.55 (p<0.05)
Mn	Ls+As	13.5	Vp	0.1596	0.006	22	0.58 (p<0.01)
Mn	Ls+As	50.0	Vp	0.2249	0.068	19	0.70 (p<0.001)
Mn	Ls+As	150.0	Vp	0.2632	0.0054	17	0.63 (p<0.01)
Mn	Ls+As	50.0	VmPE	0.1566	0.0068	12	0.60 (p<0.01)
Mn	Ls+As	150.0	VmPE	0.1906	0.0063	12	0.62 (p<0.01)
Mn	Tc	13.5	VMaPE	0.0490	0.0061	12	0.72 (p<0.01)
Mn	Tc	50.0	VMaPE	0.1507	0.0059	12	0.79 (p<0.01)
Mn	Tc	150.0	VMaPE	0.1105	0.0065	12	0.79 (p<0.01)
Cu	TS	13.5	Dur	0.0277	0.00001	22	0.56 (p<0.01)
Cu	TS	50.0	Dur	0.0263	0.00002	19	0.69 (p<0.001)
Cu	TS	150.0	Dur	0.0207	0.00004	17	0.88 (p<0.001)
Cu	Ls+As	150.0	Dur	0.0162	0.00003	12	0.65 (p<0.05)
Cu	LF+VM	50.0	Vp	-0.0063	0.004	7	0.87 (p<0.05)
Cu	LF+VM	150.0	Vp	-0.0555	0.0123	7	0.94 (p<0.01)
Cu	LF+VM	50.0	VMaPE	-0.0336	0.0024	7	0.77 (p<0.05)
Cu	LF+VM	150.0	VMaPE	-0.1513	0.008	7	0.88 (p<0.01)
Cu	Tc	13.5	VmPE	-0.397	0.0193	10	0.66 (p<0.05)
Zn	LF+VM	50.0	Vp	-0.322	0.105	7	0.76 (p<0.05)

(*)a y b coeficientes de regresión (concentración de un nutriente = a + b parámetro climático), N números de datos, r coeficiente de determinación de la regresión y significancia, Dur duración de la tormenta, Vp velocidad promedio, VmPE velocidad media en período de excedencia, VMaPE velocidad máxima en período de excedencia TS todos los sitios, TA todas las alturas, Tc suelos terciarios, Lsloésicos, Ar arenoso, LF Los Frentones, VM Villa Mercedes.