



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

TESINA PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO
ACADÉMICO DE INGENIERO EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE

**CONTENIDO DE HUMEDAD CRITICA DEL SUELO COMO
DESENCADENANTE DE LA EROSION EOLICA EN
SUELOS DE LA REGION SEMIARIDA DE ARGENTINA**

GASTON DAVID MOTA

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2014

PREFACIO

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Ingeniero en Recursos Naturales y Medio Ambiente, de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y la Facultad de Agronomía, durante el período comprendido entre 7 de diciembre 2012 y el 3 de Octubre de 2014, bajo la dirección de la Dra. De ORO, Laura Andrea y bajo la codirección de la MSc. AIMAR, Silvia Beatriz.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer en primer lugar a Laura De Oro y Silvia Aimar (directora y codirectora de la presente tesina) por su inestimable ayuda durante todo el proceso del trabajo, y más aún en las etapas finales del mismo. A mi familia, en especial a Mamá, por todo el esfuerzo realizado para la concreción de este gran objetivo de poder ser un profesional, un objetivo que se transforma en colectivo por estar presente desde todos los puntos de vista. A Ana Lozza y Manuel Lillo, por su colaboración en las etapas de muestreo. A Manuel Lillo, por su ayuda en una parada muy complicada durante la carrera. A Nico Secco, quien con su confianza, permite hoy que tenga un gran trabajo. A EVARSA, por abrirme las puertas al mundo laboral aún no siendo un profesional, pero depositando confianza y responsabilidad en mí. A Herman, Helen, Alan, Marlen y los papás Minig, quienes me arroparon como un hermano e hijo. A ese gran grupo de amigos, Manu Lillo, Franco, Colo, Tato, Lucas, Jose Toral, Pame, Guada, Ana, Fer Andrade, Ricky, Ana, Agustina, Rocio, Fer Gonzalez, Tuti, Gaston Buss, Marian Mattei, quienes han ayudado con su amistad a que mi paso por la universidad esté marcado de grandes momentos. A mis amigos de la vida Diego, Gonza, Mauri, Tincho, Dani, Nico y Guille Esteban, aunque la distancia nos fue separando, siempre tenemos la certeza de que volver a encontrarnos un fin de semana es motivo de reunión y alegría. A todos los que de un modo u otro estuvieron y saben que les guardo un gran cariño, MUCHAS GRACIAS.

Y para cerrar, vaya mi dedicatoria a las luchas obreras y estudiantiles, en especial a los despedidos de Lear, y recordar a Mariano Ferreyra, Luciano Arruga, Jorge Julio López y tantos (lamentablemente) otros muertos y desaparecidos en democracia en la búsqueda

de un horizonte más justo. A las mujeres que día a día luchan por ser escuchadas y buscan justicia ante el sufrimiento por la violencia de género en todas sus variantes.

5 de Noviembre de 2014

Gastón David MOTA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

RESUMEN

La erosión eólica es uno de los procesos de degradación de suelo más relevantes en regiones áridas y semiáridas del mundo. Los factores que influyen en el proceso de erosión eólica son esencialmente la erosividad del viento, la erodabilidad del suelo y un impacto combinado de ambos. La velocidad umbral es la velocidad mínima del viento que permite iniciar el movimiento de las partículas del suelo. Uno de los factores más importante que determina dicha condición es el contenido de humedad del suelo. Este parámetro, de alto dinamismo y variabilidad, tiene un impacto crítico en la predicción del proceso de deflación y transporte de partículas por el viento. El presente trabajo tiene como objetivos calcular el contenido de humedad crítica por debajo del cual comienza el proceso erosivo, encontrar relaciones entre las propiedades edáficas y los contenidos críticos de humedad y medir el perfil de erosión en 7 suelos texturalmente diferentes de la Región Semiárida de Argentina. El estudio se llevo a cabo en condiciones controladas mediante la utilización de un túnel de viento portátil. La cantidad de material erosionado en función de los contenidos de humedad y de la altura sobre la superficie del suelo se analizó por medio de análisis de regresión. En los 7 suelos analizados: La Victoria (LV), Facultad Natural (FN), Facultad degradado (FD), Olivillos (OV), Buena Esperanza (BE), Cramer (CR) y Anguil (AN) la cantidad de material erosionado disminuyó a medida que aumentó la humedad del suelo. Para los suelos de FD, OV, BE, CR y AN donde la humedad varió entre un 25 y 75%, la cantidad de material erosionado tuvo un rango de 0 a 0.6 g, mientras que, para los suelos de FN y LV donde la humedad varió entre un 15 y 30 % el rango de material erosionado fue de 0 a 0.3 g. Existió una relación lineal positiva entre el contenido crítico de agua en el suelo (Θ_c) y el % de arcilla (A%) y de materia orgánica (MO), ambas propiedades mejoran la absorción del agua en el suelo. Θ_c varió entre 5.3 y 8.1 %, correspondiendo el valor más bajo a BE (suelo texturalmente grueso) y el valor más alto a la LV (suelo texturalmente fino). La cantidad de material erosionado varió de manera exponencial y negativa con la altura a la cual se colectó. La mayor diferenciación de recolección entre suelos se da hasta los 11 cm, luego la diferencias disminuyen hasta alcanzar una altura de 28.5 cm donde todos los suelos presentan la misma cantidad de material erosionado. Podemos concluir que suelos de texturas más gruesas se erosionaron más que los suelos de texturas finas ya que presentan menores valores de Θ_c y que dicho patrón de erosión estuvo fuertemente

influenciado por el Θ inicial de cada suelo, el cual depende principalmente % A y de MO. Como línea futura de investigación, estos resultados deberían ser validados con mediciones hechas a campo.

ABSTRACT

Wind erosion is one of the most important soil degradation processes in arid and semiarid regions of the world. Factors influencing the wind erosion process are essentially the erosivity of wind, erodibility of soil and the combined impact of both. Threshold wind velocity (μt) is the minimum wind speed that allows starts with the soil particles movement. Soil moisture is one of the most important factors influencing in this condition. This parameter, is more dynamics and changeable and has a critical impact on the predicting deflation process and on the particle transport by wind. The present work has the objectives to calculate the critical water content below which wind erosion process begins, to find relationships between soil properties and the critical water content (Θ_c), and measure the erosion profile on 7 soils with different texture of the semiarid region of Argentina. The study was carried out under controlled conditions using a portable wind tunnel. The amount of eroded material as a function of water content and the height above surface was analyzed by regression analysis. In the 7 soils analyzed: La Victoria (LV), Facultad Natural (FN), Facultad Degradado (FD), Olivillos (OV), Buena Esperanza (BE), Cramer (CR) and Anguil (AN) the amount of eroded material decreased as soil moisture increased. For soils of FD, OV, BE, CR and AN where the soil moisture varied between 25 and 75%, the amount of eroded material ranged from 0 to 0.6 g, whilst for FN and LV where soil moisture varied between 15 and 30%, the eroded material ranged from 0 to 0.3 g. There existed a positive linear relationship between Θ_c and the % of clay (A) and organic matter (MO), both properties improve the soil water absorption, and have, an effect on wind erosion in soils of semiarid regions. Θ_c varied between 5.3 and 8.1%, corresponding to the lowest value to BE (texturally coarse soil) and the highest value to LV (texturally fine soil). The amount of eroded material varied negatively and exponentially with the height at which the eroded material was collected. More differences between the amounts of soil sampled occurred through 11 cm, and then decreased to a height of 28.5 cm. We can conclude that coarse texture soil were more eroded than fine texture soil because they have lower Θ_c which is strongly influenced by initial Θ , which depends on % A and MO. As future research line, these results should be validated with field measurements.

INDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problema Científico.....	5
1.2 <u>Hipótesis</u>	5
1.3 <u>Objetivos</u>	6
2 MATERIALES Y MÉTODOS	7
2.1 Sitios Experimentales	7
2.2 Ensayos en túnel de viento	7
2.3 Instrumentos de medición.....	7
3 <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	13
3.1 Contenido crítico de agua en suelos de diferentes texturas	13
3.2 Material erosionado en función de la altura en suelos de diferentes texturas	17
4 CONCLUSIONES	23
5 BIBLIOGRAFÍA	24
6 ANEXOS	28

1 INTRODUCCION

La erosión eólica es uno de los procesos de degradación del suelo más relevantes en regiones áridas y semiáridas del mundo (Dregne, 1986), mediante el cual se produce la remoción, la selección y transporte del material superficial por la acción del viento (Buschiazzo y Aimar, 2003). Este proceso ocurre cuando se presentan algunas de las tres condiciones:

- a) La velocidad del viento excede la velocidad umbral requerida para iniciar el movimiento de las partículas.
- b) El tamaño de las partículas del suelo es lo suficientemente pequeño como para que se erosione.
- c) La superficie del suelo carece de la protección que provee la existencia de una adecuada cobertura de residuos vegetales, canopia y/o la rugosidad del terreno (Saleh y Fryrear, 1997).

La magnitud de la erosión depende de condiciones geológicas, climáticas y de cobertura de la tierra, y su ocurrencia tiene efectos directos sobre el suelo y el ecosistema en general. Los efectos sobre el suelo involucran disminución de la fertilidad física, tales como reducciones de la profundidad efectiva del perfil, cambios granulométricos y degradación de la estructura y de la fertilidad química por pérdida de materia orgánica (MO) y de nutrientes (Lyles y Tatarko, 1986; Buschiazzo y Taylor, 1993; Gabel, 1993). Otro efecto a considerar es la potencial emisión de material particulado en suspensión de tamaño menor a 10 μm de diámetro (PM10), dado que la erosión eólica de suelos agrícolas es una de mayores fuentes de aerosoles atmosféricos que modifican tanto la calidad del aire (Pope *et al.*, 1996) como la radiación, contribuyendo de esta manera a cambios climáticos globales y regionales. Las PM10 no sólo generan polución ambiental, sino también incrementan la intransitabilidad de caminos y pueden desencadenar enfermedades respiratorias, provocando daños irreversibles y grandes pérdidas económicas (Redmond *et al.*, 2000; Yu *et al.*, 2001; Charlson *et al.*, 1991; Herut *et al.*, 2001).

El viento produce una remoción selectiva de las partículas del suelo debido a que las mismas se mueven de diferentes maneras en función de su tamaño, densidad y forma (Aimar *et al.*, 2003). La selección de partículas es un proceso de degradación de suelos tan importante como la pérdida de masa, ya que provoca cambios textuales al transportar partículas finas, enriquecidas en nutrientes y acumular, residualmente, las partículas más gruesas, menos fértiles (Lyles, 1988; Buschiazzo y Aimar, 2003). Buschiazzo y Taylor (1993) concluyeron que los suelos de la Región Semiárida Pampeana (RSP) de Argentina se vuelven más arenosos y que el cambio textural disminuye la capacidad del suelo para acumular MO y la proporción de elementos esenciales, principalmente de fósforo y nitrógeno (Mendez *et al.*, 2006).

La Figura 1 muestra los diferentes procesos simultáneos de transporte de partículas que ocurren durante la erosión eólica que involucra la movilización, abrasión, transporte y deposición de partículas, a menor o mayor distancia dependiendo de su tamaño (Papendick, 1998) y de las características del viento cerca de la superficie (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 (Chepil, 1958). Las partículas pueden ser transportadas por saltación, suspensión, o rodadura.

La saltación es la forma de transporte más importante en el proceso de erosión, ya que se transporta entre un 50 y un 80 % del total de material erosionado por el viento (Lyles, 1988). La saltación provoca, además, los movimientos de suspensión y rodadura. Las partículas poseen un diámetro que oscila entre los 100-500 μm .

Las partículas que se mueven por suspensión son la parte más visible de la erosión eólica en forma de grandes tormentas de polvo. Las partículas suspendidas tienen un rango de tamaño que va desde los 2 a 100 μm (Gillette y Walker, 1977). Si bien partículas $< 20 \mu\text{m}$ están presentes en el suelo, la mayor parte de ellas se generan por la acción abrasiva del viento durante el proceso de erosión. Chepil (1945) reportó que entre un 3-38 % del suelo erosionado puede ser transportado por suspensión, dependiendo de su textura.

El transporte por rodadura se realiza sin un despegue de las partículas de la superficie del suelo. Las partículas poseen un diámetro mayor a 500 μm . El transporte por

rodadura constituye entre el 7-25 % del total del transporte producido por erosión eólica. Si bien es un transporte pasivo, muchas partículas que se mueven por rodadura pueden desgastarse hasta alcanzar el tamaño necesario para sufrir saltación y/o suspensión, cambiando de esta manera su forma de transporte (Chepil, 1945).

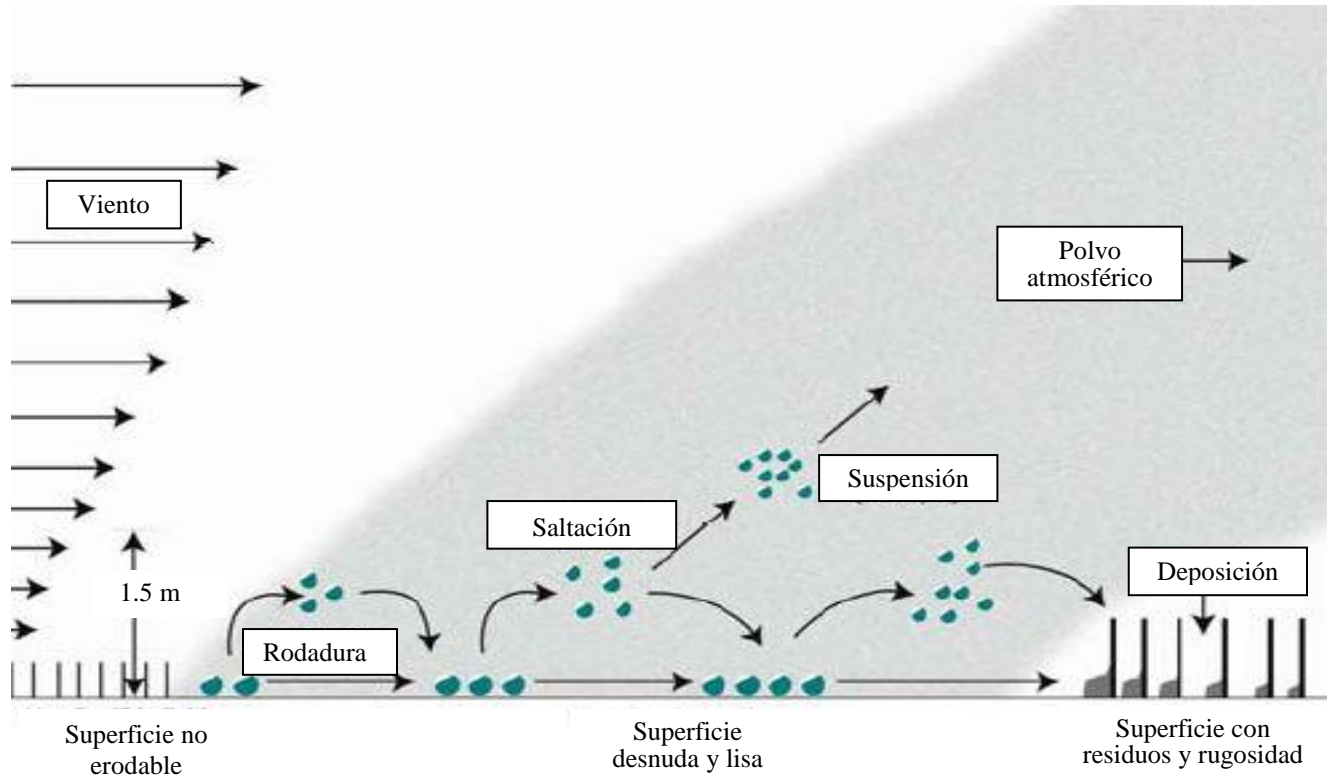


Figura 1. Representación esquemática de los procesos de transporte de partículas por el viento.

Estudios llevados a cabo en Argentina han establecido que suelos de distinta génesis tendrán un diferente comportamiento en cuanto al medio de transporte de las partículas. De esta forma, establecieron que en suelos derivados de materiales loésicos el proceso erosivo produce una degradación a nivel de lote, ya que es importante la masa de suelo que se mueve por saltación. En tanto en aquellos derivados de materiales terciarios (suelos de la Patagonia), existe un mayor transporte de partículas por suspensión, por lo cual la erosión por viento produce un mayor efecto sobre el ambiente (Buschiazzo *et al.*, 2009).

Los factores que influyen en el proceso de erosión eólica son esencialmente la erosividad del viento, la erodabilidad del suelo y un impacto combinado de ambos (Chepil y Woodruff, 1963). La acción erosiva del viento depende de su velocidad y de varios factores relacionados con la superficie del suelo, el tamaño y la estabilidad de los agregados, el contenido de arcilla y de materia orgánica, la cobertura vegetal y el contenido de humedad cerca de la superficie. La velocidad umbral (μt) es la velocidad mínima del viento que permite iniciar el movimiento de las partículas del suelo, dando lugar al proceso de erosión eólica (Bagnold, 1941). Entre los factores que gobiernan las condiciones umbrales, el contenido de humedad del suelo es uno de los más importantes (Ravi *et al.*, 2004, 2006; Cornelis *et al.*, 2004 1 y 2; de Oro y Buschiazzo, 2009), y dado su alto dinamismo y variabilidad tiene un impacto crítico en la predicción del proceso de deflación y transporte de partículas por el viento (Cornelis y Gabriels, 2003), ya que contribuye fuertemente a aumentar μt al incrementar la adhesión de las partículas entre sí (McKenna-Neuman y Nickling, 1989).

Varios autores han definido al contenido crítico de agua como el contenido de agua en el suelo superficial cuando la erosión eólica comienza (Chen *et al.*, 1996; Saleh y Fryrear, 1995), y otros han estudiado la influencia de la humedad sobre los mecanismos de la erosión (Chepil, 1956; Azizov, 1977; Chen *et al.*, 1996; Ravi *et al.*, 2006; Bolte *et al.*, 2011). Bolte *et al.* (2011), calcularon rangos de contenido de agua y potenciales mátricos críticos para el inicio de la erosión eólica, utilizando solo un tipo del suelo. Saleh y Fryrear (1995) establecieron un valor de contenido de agua crítico cercano a un potencial mátrico de 1,5 MPa, por encima del cual no ocurre erosión eólica. Este valor de contenido de agua crítico es sostenido por varios autores, aunque varían de acuerdo al tipo de suelo. Bisal y Hsies (1966), encontraron que un 4% de contenido de agua puede prevenir la erosión de suelo arenoso franco fino. Nickling (1978), en tanto, encontró que entre 3-4% (gravimétrico) es el contenido de humedad crítico de la superficie del suelo para suelos de Slims River Valley, Yukón, Canadá, donde la superficie se compone de arenas finas y limo.

El conocer, cuantificar y evaluar los efectos de la erosión eólica es imprescindible a la hora de evitar o mitigar los daños ocasionados por la degradación de los suelos (Buschiazzo y Aimar, 2003). Para ello se han desarrollado distintos modelos de predicción

basándose en simulaciones a nivel de lote. La Ecuación de Erosión Eólica (WEQ) desarrollada por Woodruff y Siddoway (1965), fue el único modelo disponible hasta la década del '90, cuando fueron desarrollados dos nuevos modelos: la Ecuación Revisada de Erosión Eólica (RWEQ) (Fryrear *et al.*, 1998) y el Sistema de Predicción de la Erosión Eólica (WEPS) (Hagen, 1991). En estos dos últimos modelos, se incorporó el contenido de humedad del suelo como un parámetro fundamental en el cálculo de la erosión eólica, de allí la importancia de su investigación.

Se estima que alrededor de un 75 % de la superficie de Argentina es muy vulnerable a la erosión eólica (Buschiazzo y Aimar, 2003), dado que una gran proporción de los suelos de Argentina evolucionan sobre sedimentos loésicos, material extremadamente susceptible a ser retransportado por el viento, lo que les confiere una alta erosionabilidad. Panebianco y Buschiazzo (2008) comprobaron que en suelos de textura arenosa franca y franco arenosa de la RSP, la erosión superó las tasas permisibles para suelos de estas texturas, que se encuentra en aproximadamente $8 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

1.1 Problema científico

La mayoría de los trabajos referidos a la humedad crítica del suelo han utilizado muestras de suelo disturbadas, y/o tamizadas, para desarrollar simulaciones en túneles de viento. Estos pretratamientos, aunque han permitido conocer en detalle las condiciones bajo las cuales se inicia el movimiento de las partículas, no reflejan fehacientemente la situación real de los suelos labreados, en los cuales coexisten agregados y partículas erosionables y no erosionables. Surge del relevamiento bibliográfico a nivel internacional la escasez de información respecto a contenidos críticos de agua en el suelo utilizando muestras superficiales sin disturbar. Por otra parte no existe información para suelos de Argentina. Por lo tanto, el presente trabajo permitirá conocer los valores críticos de humedad a partir del cual se origina el proceso de erosión eólica, en siete suelos correspondientes a la Región Semiárida Central de Argentina.

1.2 Hipótesis

- 1) El contenido crítico de agua, por debajo del cual ocurrirá erosión, dependerá de la textura de los suelos, siendo menor en los suelos de texturas más gruesas.
- 2) La cantidad de material erosionado en función de la altura será mayor en suelos con texturas más gruesas.

1.3 Objetivos

- 1) Calcular para suelos texturalmente diferentes los contenidos de humedad crítica, por debajo del cual comienza la erosión eólica.
- 2) Encontrar si existen relaciones entre las propiedades edáficas y los contenidos de humedad crítica para los suelos estudiados.
- 3) Cuantificar la cantidad de material erosionado en función de la altura, partiendo de suelos secos al aire.

2 MATERIALES Y METODOS

2.1 Sitios Experimentales

El estudio se llevó a cabo sobre 7 suelos de la Región Semiárida de Argentina con texturas y contenido de MO bien diferenciados (Tabla 2). El primer suelo fue obtenido de una zona de caldenal en La Estancia La Victoria (LV), ubicado 11 km al este del centro de la ciudad de Santa Rosa, La Pampa ($36^{\circ}37'23''\text{S}$, $64^{\circ}09'17''\text{W}$), el segundo, tercer y cuarto suelo fueron colectados de diferentes sectores dentro del campo de enseñanza de la Universidad Nacional de La Pampa. El primero de ellos pertenece a un potrero sin laboreo en los últimos 20 años denominado como Facultad Natural (FN) y se encuentra ubicado en las cercanías del lugar donde se llevo a cabo el experimento ($45^{\circ}41'12''\text{S}$, $70^{\circ}15'35''\text{W}$), el segundo pertenece a un suelo que se ha mantenido sin cobertura y sin rugosidad en los últimos 15 años, denominado Facultad Degradado (FD) ubicado dentro de los módulos de labranza ($36^{\circ}32'27.4''\text{S}$, $64^{\circ}17'39.8''\text{W}$) y el tercer suelo se obtuvo de una zona de médanos ($36^{\circ}33'51.5''\text{S}$, $64^{\circ}18'20.6''\text{W}$) denominada Olivillos (OV). El quinto suelo denominado Anguil (AN) está ubicado en el Campo Experimental de INTA Anguil, La Pampa ($36^{\circ}5'\text{S}$; $64^{\circ}25'\text{W}$) y los dos restantes suelos pertenecen a la provincia de San Luis, Argentina: ambos desarrollados sobre arenas eólicas, el primero de ellos denominado Cramer (CR) ($33^{\circ}67'28''\text{S}$, $65^{\circ}37'60''\text{W}$) y el segundo denominado Buena Esperanza (BE) ($33^{\circ}98'61''\text{S}$, $65^{\circ}32'31''\text{W}$).

2.2 Ensayos en túnel de viento

De estos suelos se extrajo una muestra representativa de los primeros 20 cm. Se guardaron en bandejas y cubrieron con bolsas para su posterior traslado, se dejaron secar al sol y luego se colocaron en la bandeja de muestreo del túnel. A diferencia de los antecedentes mencionados, estas no pasaron por ningún proceso de tamizado y homogeneizado, resguardando así, las condiciones naturales que poseen.

2.3 Instrumentos de medición

Tabla 1. Propiedades de los diferentes suelos utilizados en el presente estudio: La Victoria (LV), Facultad Natural (FN), Facultad Degradado (FD), Olivillos (OV), Anguil (AN), Cramer (CR) y Buena Esperanza (BE).

Suelos	Textura						Clase Textural	Materia Orgánica
	%							
	Arcilla < 2	Limo 2 -50	50 - 75	Arena				
μm							%	
			75 - 150	150 – 250	250 - 2000			
LV	18.10	39.8	1.2	14.6	7.7	9.45	Franco	6.2
FN	13.14	24.83	27.15	15.75	9.15	7.35	Franco arenoso	3.7
FD	9.74	16.06	32.6	22.4	11.35	7.2	Franco arenoso	0.9
OV	7.23	19.01	24.05	30.95	10.55	7.85	Franco arenoso	2
AN	7.59	14.26	12.25	43.9	14.6	7.2	Arenoso franco	1.3
CR	7.55	11.94	4.15	51.85	17.3	7.1	Arenoso franco	1.5
BE	6.52	12.47	3.45	36.1	27.35	12.95	Arenoso franco	1.2

El túnel de viento (Figura 2) utilizado está compuesto por un chasis, un motor y su hélice y las secciones del túnel propiamente dicho. El chasis posee 3.8 m de largo, 2.3 m de ancho y 2.3 m de alto siendo el mismo construido de hierro. Posee tres plataformas de madera adosadas que se utilizan para transportar las secciones del túnel y la placa cribada. El motor está en la parte superior del chasis, es un motor marca Honda GX 670 de 24 HP. Por medio de una correa y poleas reductoras (2.5: 1) acciona una hélice que se encuentra por debajo del motor y gira a una velocidad máxima de 1000 rpm. La misma tiene 1 m de diámetro y está compuesta por 8 palas de 0.35 m de diámetro en ángulo de 40°. El aire impulsado por la hélice es conducido hacia una sección en forma de S construida en chapa galvanizada cuya función es descender el flujo de aire a la altura del suelo. Luego el aire pasa por una placa cribada con 196 orificios de 2.5 cm de diámetro cada uno, que reduce la turbulencia del flujo de aire. En este punto el flujo de aire ingresa a la sección del túnel propiamente dicha, formada por tres secciones de 2 m de largo, 1 m de alto y 0.5 de ancho. La primera sección está totalmente recubierta (presenta piso) y en la entrada de la misma se ubica el conjunto de placas deflectoras que se encargan de orientar el flujo de aire y de esta manera generar el perfil logarítmico. Siguiendo a la misma se encuentran las otras dos secciones del túnel sin piso indicada como la zona de medición. Para este estudio se utilizaron bandejas de madera que se colocaron como piso quedando solamente como lugar de medición una superficie de 0.30 m de ancho x 1.03 m de largo (Figura 2d). Estas dos últimas secciones poseen ventanas en la parte superior y los laterales que permiten modificar la zona de medición sin necesidad de desacoplar los tramos del túnel.

Las simulaciones de erosión con el túnel de viento se realizaron a una velocidad 10.5 m s^{-1} que se controló con un anemómetro con sistema de tubo Pitot colocado a la salida del túnel, a 60 cm de altura de la superficie del suelo y a 25 cm desde la pared lateral del túnel. Tanto la velocidad como el perfil vertical logarítmico del viento fueron calibrados previamente. Las simulaciones tuvieron una duración de 3 minutos.

La humedad del suelo se midió utilizando un sensor de humedad colocado a 2.5 cm por debajo de la superficie del suelo (Figura 3). La primer simulación se realizó utilizando el contenido de humedad que le quedó a cada muestra de suelo luego de ser secada al aire, luego las muestras de suelo se fueron humedeciendo para obtener diferentes contenidos

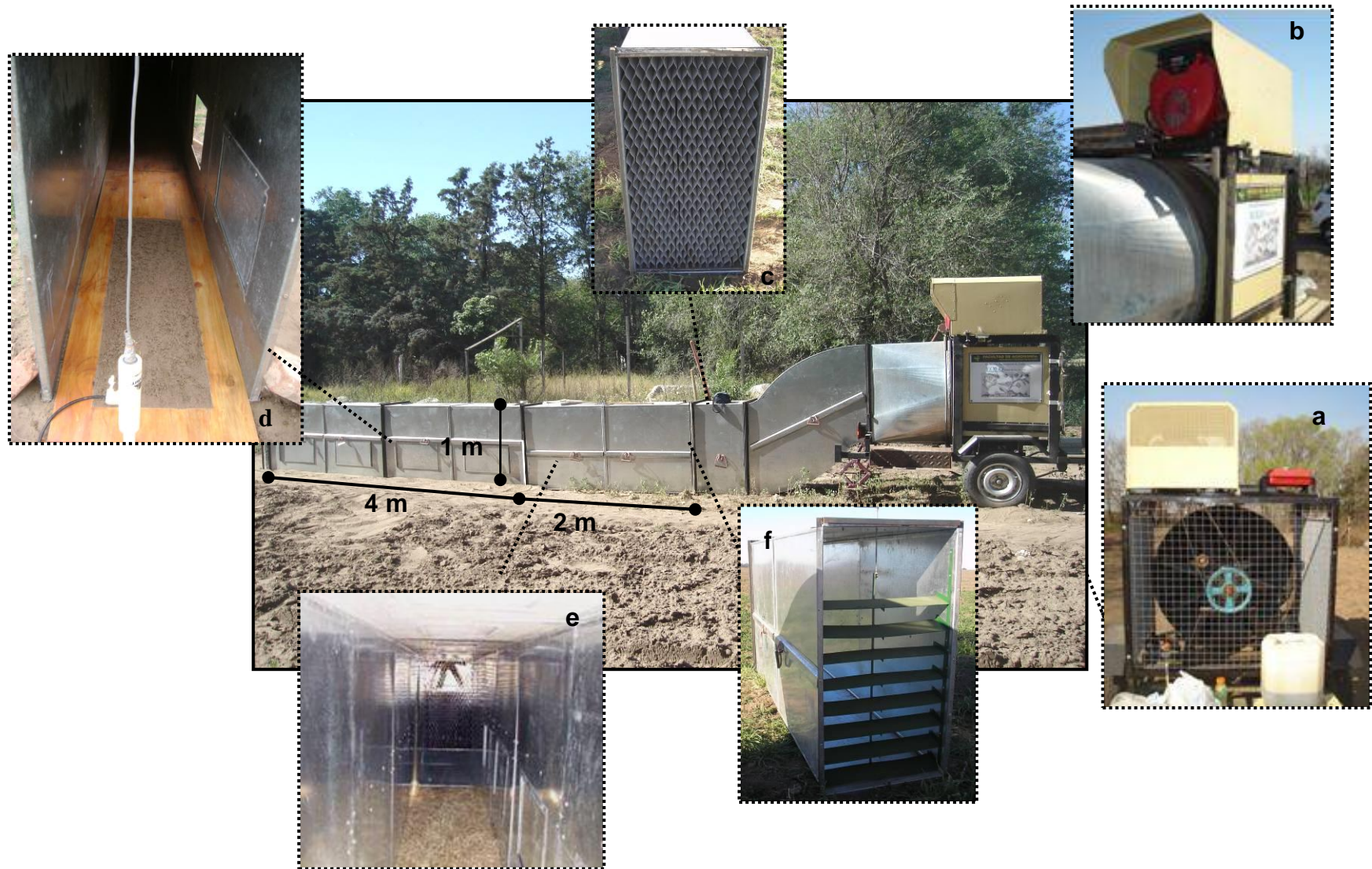


Figura 2. Componentes del túnel de viento portátil. a) hélice, b) motor con carcasa protectora, c) placa cribada, d) zona de medición e) tramo del túnel con piso, f) chapas deflectoras.

de humedad hasta alcanzar el contenido de agua crítico para cada suelo. Chen *et al.* (1996) y definen al contenido crítico de agua como el contenido de agua del suelo superficial cuando inicia el proceso de erosión eólica.

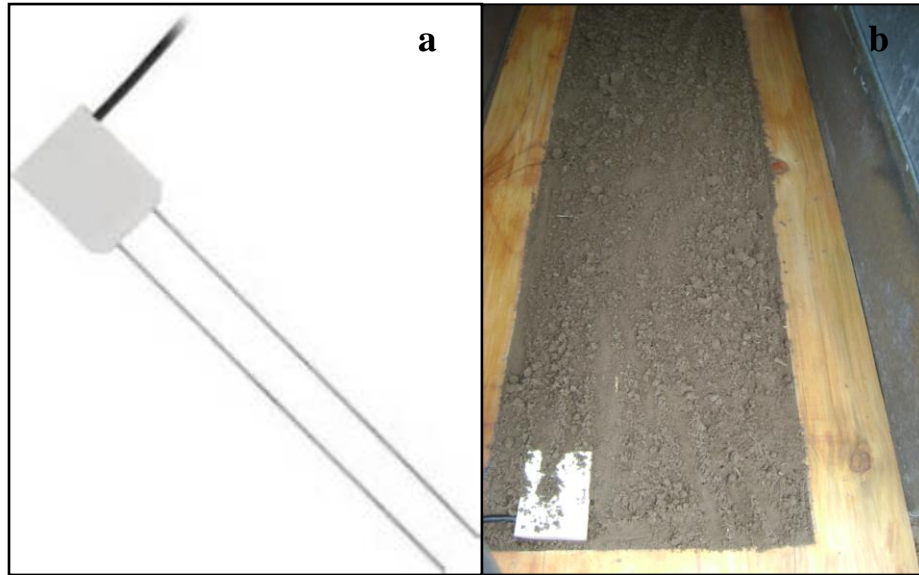


Figura 3. Sensor de humedad: a) imagen del equipo y b) instrumento colocado en el área de medición.

Los registros de humedad y velocidad de viento se almacenaron de manera continua en un datalogger con una frecuencia de 1 segundo.

La humedad relativa del suelo (HR) se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$HR = (\Theta / Heq) * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

siendo Θ el contenido de agua del suelo (%) y Heq la humedad equivalente de cada suelo obtenida en laboratorio.

La humedad relativa crítica (HRc, %) de cada suelo se obtuvo a partir de las ecuaciones de regresión obtenidas para expresar la relación entre humedad relativa del suelo (%) y cantidad de material erosionado (g) considerando ($y=0$).

El contenido crítico de humedad del suelo (Θ_c , %) se obtuvo utilizando el valor de HRc y mediante el despeje de la Ec. (1).

Para cuantificar el material erosionado se utilizó a la salida del túnel un soporte de madera, al cual se le colocaron etiquetas autoadhesivas de 9,91cm x 5,7cm completando una altura de 30 cm, con el lado cementado hacia la boca del mismo. La cantidad de material erosionado (g) se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Material erosionado} = T_s - T_t \quad \text{Ec. (2)}$$

siendo T_s el peso de la tarjeta con el suelo erosionado y T_t el peso de la tarjeta sin suelo.

La cantidad de material erosionado en función de los diferentes contenidos de humedad y de la altura sobre la superficie del suelo, para cada uno de los suelos estudiados se analizó por medio de análisis de regresión y mediante gráficos. El valor de humedad crítico de agua para cada suelo se calculó a partir de la ecuación de regresión humedad relativa del suelo y material erosionado.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Contenido crítico de agua en suelos de diferentes texturas

- *Hipótesis 1: “El contenido crítico de agua, por debajo del cual ocurrirá erosión, dependerá de las texturas de los suelos, siendo menor en los suelos de texturas más gruesas”*

La figura 4 muestra la relación entre la cantidad de material erosionado en función de diferentes porcentajes de humedad relativa del suelo. En los 7 suelos analizados se pudo apreciar un ajuste lineal negativo (Tabla 2, $p < 0.05$), lo que estaría indicando que a medida que aumenta la humedad relativa del suelo, menor es la cantidad de material erosionado en cada uno de los ellos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por diferentes autores (Chen *et al.*, 1996; Fécan *et al.*, 1999, Bolte *et al.*, 2011) donde resaltan la dependencia

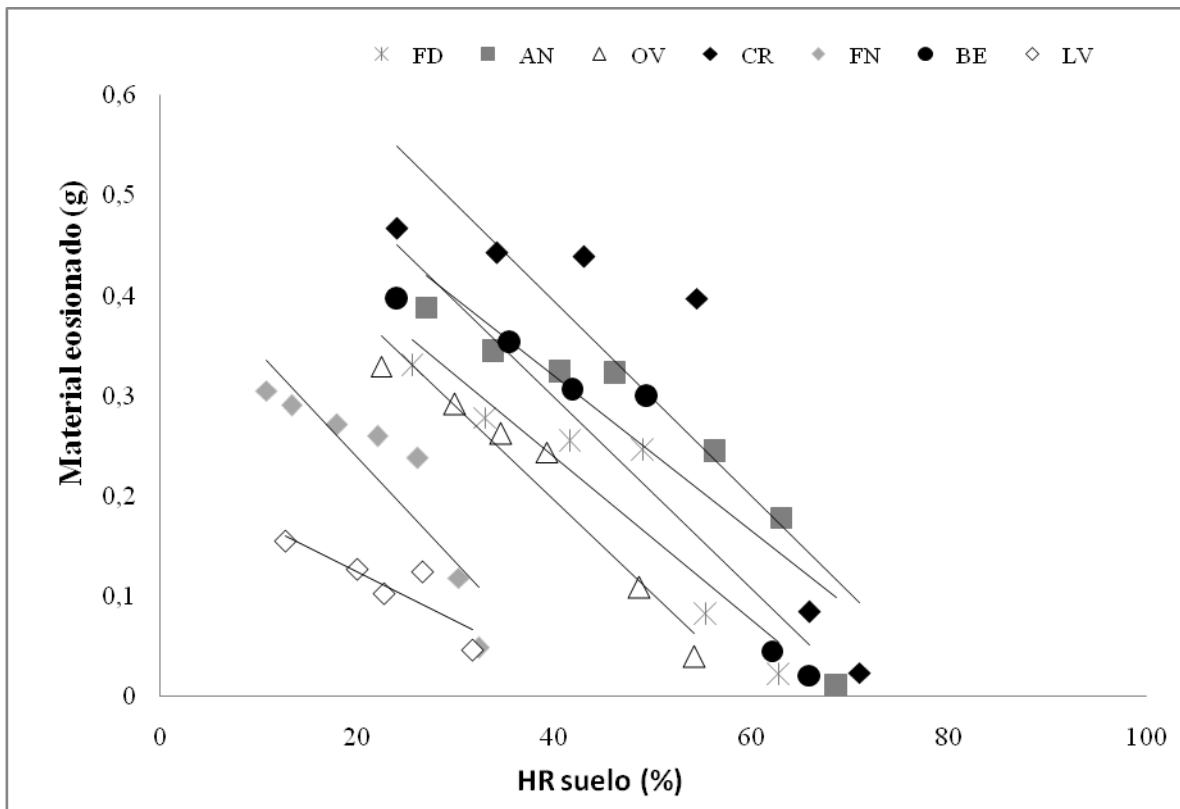


Figura 4: Material erosionado (g) en función de la Humedad relativa de suelo (%) en 7 sitios con suelos diferentes: FD (Facultad degradado), AN (Anguil), OV (Olivillos), CR (Cramer), FN (Facultad natural), BE (Buena Esperanza) y LV (La Victoria).

negativa que existe entre la pérdida de material erosionado y el contenido de humedad del suelo y que ésta varía según la textura de los mismos.

La acción del viento sobre la superficie de los distintos suelos mostró comportamientos disímiles lo cual nos permitió diferenciar dos grupos: el primero de ellos, suelos de texturas más gruesas: Anguil (AN), Cramer (CR), Olivillos (OV), Buena Esperanza (BE) y Facultad degradado (FD) donde la humedad relativa varió entre un rango de 25 y 75%, y un segundo grupo representado por suelos de texturas más finas: La Victoria (LV) y Facultad Natural (FN) con su rango de humedad mucho más acotado, entre 15 y 30 %. En el primer grupo la cantidad de material erosionado para ese rango de humedades fue de 0 a 0.6 g mientras que para el segundo grupo fue de 0 a 0.3 g. Estos resultados estarían indicando que los suelos texturalmente más gruesos y en general con bajo % de MO son muchos más susceptibles a erosionarse por el viento que suelos de texturas más finas y con alto % MO. Un suelo de textura más gruesa necesita humedades relativas mayores (HR crítica) para que la remoción de material cese. En este estudio se necesitó una humedad promedio de 71.7 % para suelos texturalmente más gruesos, en tanto, en los suelos más finos la erosión cesa a humedades menores, en promedio 42.8 %.

Los contenidos críticos de agua del suelo (Θ_c) fueron obtenidos a partir de la Tabla 2. Θ_c varió entre 5.3 y 8.1 %, correspondiendo el valor más bajo al suelo de BE (textura más gruesa) y el valor más alto al suelo de LV (textura más fina). Θ_c refleja nuevamente los dos grupos mencionados en el párrafo anterior. En el primero de ellos, se encuentran los suelos de LV y FN con valores de Θ_c de 8.07 y 7.96 % y en el segundo estarían los suelos de BE, CR, FD, OV y AN con valores de Θ_c de 5.38, 6.18, 6.62, 6.76 y 6.99 %, respectivamente. Los suelos de LV y FN se caracterizan por tener una fracción L+ A de 58 y 38 % y un % de MO de 6.2 y 3.7, respectivamente, mientras que para los 5 restantes suelos (BE, CR, FD, OV y AN) ambos parámetros fueron más bajos (Tabla 1). Los valores de L+A para estos suelos fueron de 19, 19.5, 25.8, 26.3 y 21.9, respectivamente y los % MO de 1.2, 1.5, 0.9, 2 y 1.3, respectivamente. Mayores valores de Θ_c indican que esos suelos (LV y FN) tienen una mayor resistencia a erosionarse por la acción del viento. Esta mayor resistencia está dado por los altos contenidos de MO y de la fracción L+A, en

Tabla 2. Valor de los coeficientes de regresión existentes entre la cantidad de material erosionado (g) y la humedad relativa del suelo (%) de los 7 sitios muestreados: FD (Facultad degradado), AN (Anguil), OV (Olivillos), CR (Cramer), FN (Facultad natural), BE (Buena Esperanza) y LV (La Victoria).

Sitio	Coeficiente de regresión ¹				HR _{Crítica} [*] (%)
	a	b	R ²	n	
LV	-0.005	0.224	0.76, p<0.05	5	44.8
FN	-0.011	0.449	0.803, p<0.01	7	40.8
FD	-0.008	0.563	0.863, p<0.01	6	70.4
OV	-0.009	0.569	0.946, p<0.01	6	63.2
CR	-0.010	0.783	0.794, p<0.01	6	78.3
BE	-0.010	0.681	0.888, p<0.01	6	68.1
AN	-0.008	0.629	0.843, p<0.01	7	78.6

¹ a y b son los parámetros de ajuste en la regresión de la forma $Y = -ax + b$ donde y = Material erosionado (g) y x es la humedad relativa del suelo (%).

*Este valor que corresponde a un $y=0$ se utilizó para calcular el contenido crítico de agua (Θ_c) en cada sitio.

especial el mayor contenido de arcillas ya que ambos coloides les confiere a estos suelos una mayor capacidad de retener agua. Varios autores (Belly, 1964, Saleh y Fryrear, 1995, Chen *et al.*, 1996 Fécan *et al.*, 1999, Bolte *et al.*, 2011) coinciden en que el Θ en el suelo, que depende del tipo de suelo, es muy importante para definir el umbral de erosión eólica, de hecho algunos de ellos han definido valores de Θ_c . Por ejemplo, Bolte *et al.* (2011) estableció un rango de Θ_c de 4 a 4.9 % para un suelo de textura arenosa y Bisal y Hsieh (1966) un valor de Θ_c de 4% para un suelo de textura franco arenoso fino. La discrepancia entre los valores de estos autores y los obtenidos en este estudio estaría dada por la utilización de diferentes procedimientos experimentales. Los autores antes mencionados utilizaron el túnel de viento con muestras de suelo pre-tratadas. En tanto, en este estudio se utilizó el suelo en su condición original, por lo cual el resultado se asemejaría aún más a las condiciones de campo.

Dentro del grupo donde los Θ_c fueron más bajos se observó también una variación por textura. Entre los suelos de textura arenosa franca (BE, CR y AN) existió una mayor variación de Θ_c (5.38, 6.18 y 6.99 %, respectivamente) que entre los suelos de textura franco arenosa (FD y OV) donde los Θ_c fueron muy similares (6.62 y 6.76 %, respectivamente). Esta variación pudo deberse a, que, si bien los tres suelos tienen contenido de L+A y de MO bastante similar se halló una gran diferencia en la relación arena fina (entre 50 y 150 μm de diámetro) y arena gruesa (entre 150 y 2000 μm) (Af/Ag). Esta relación fue menor para el suelo de BE, (1) respecto a los otros dos AN y CR (2.3 y 2.6 respectivamente). La menor relación en BE indica una mayor proporción de arenas finas, que aumenta la capacidad de retención de agua junto con la fracción L+A. Está demostrado que el tamaño de las partículas es inversamente proporcional a su superficie específica y a la capacidad de retención de agua (Porta Casanellas *et al.*, 2003). La superficie específica de un gramo de arenas muy finas y de arenas gruesas es de 227 y 23 cm^2/g respectivamente, por ello el mayor contenido de arenas de menor tamaño genera una mayor retención de humedad lo que hace que se incremente de esta forma el umbral de erosión. Es decir que, suelos con igual clase textural podrán tener distintas Θ_c de acuerdo a la distribución de sus arenas.

La figura 5 muestra una relación lineal positiva entre el Θ_c y la fracción arcilla (%) ($p < 0.05$). Estos resultados coinciden con los hallados por otros autores (Fecán *et al.*, 1999; Ravi *et al.*, 2004), por lo que se reafirma la importancia que tiene la textura, principalmente la fracción más fina (arcilla) en la absorción del agua en el suelo y su consecuente efecto sobre la erosión eólica en suelos de regiones semiáridas. Fecán *et al.* (1999) también encontraron una relación positiva entre la arcilla y el Θ_c y lo atribuyeron a las fuerzas electrostáticas que dicha fracción aporta al suelo permitiendo el agua se mantenga absorbida a la superficie de grano del suelo. Ravi *et al.* (2004) también encontraron que existe una relación de dependencia entre la humedad del aire y la humedad del suelo, y que ésta se hace más fuerte a medida que aumenta el % de arcilla en los suelos. Chepil (1956) por su parte, desarrolló un modelo para calcular el umbral de erosión basándose en que la humedad del suelo varía en función de su textura, dado que ésta afecta la fuerza de cohesión entre partículas y la fuerza de adhesión de éstas con el agua.

Otra propiedad importante que tiene el suelo y que contribuye a la mejor agregación

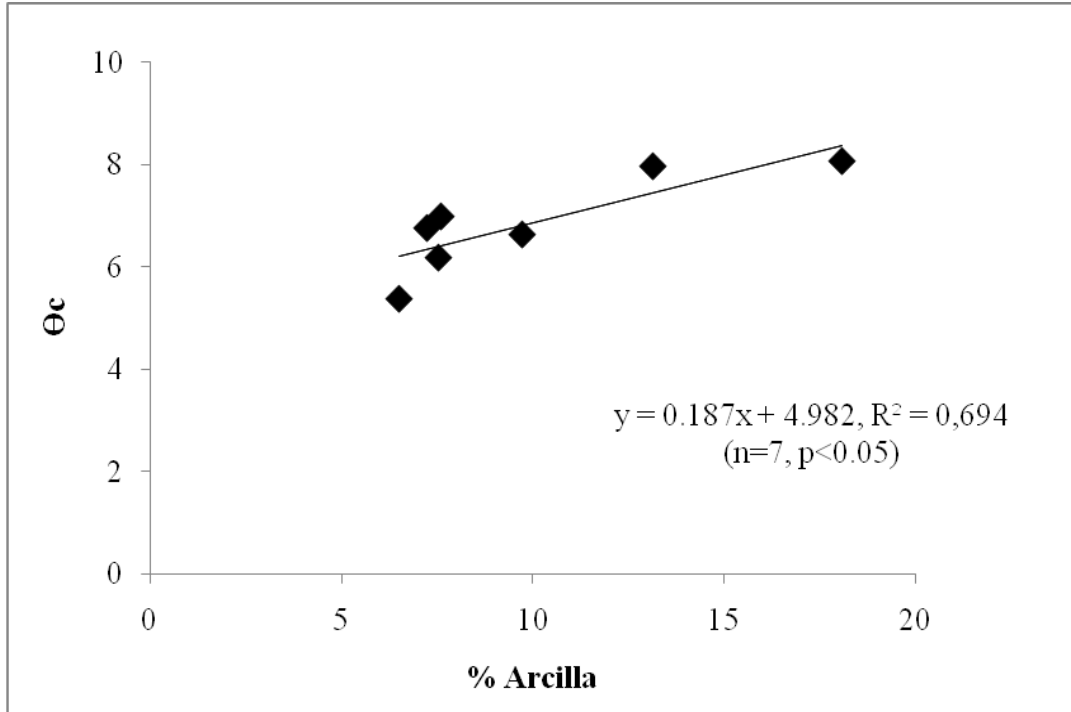


Figura 5. Relación entre el contenido Arcilla (%) y el contenido crítico de agua en el suelo (Θ_c) para los 7 suelos: BE, CR, AN, FN, FD, OV y LV.

del mismo y por ende colabora junto con la fracción arcilla a la mayor retención de agua en el suelo es la MO. En la figura 6, podemos ver que también el contenido de MO se relacionó de manera lineal y positiva con los valores de Θ_c encontrados para cada suelo. Los suelos con mayores valores de Θ_c (LV y FN) fueron los que presentaban mayor % de MO (6.2 y 3.7, respectivamente), como mínimo dos veces más que los 5 suelos restantes para los cuales el valor de MO no superó el 2%.

Estos resultados permiten validar la hipótesis 1 ya que se comprobó que los valores de Θ_c dependieron de las texturas de los suelos, siendo menores en los suelos texturalmente más gruesos.

3.2 Material erosionado en función de la altura en suelos de diferentes texturas

3) *Segunda Hipótesis: “La cantidad de material erosionado en función de la altura será mayor en suelos con texturas más gruesas”.*

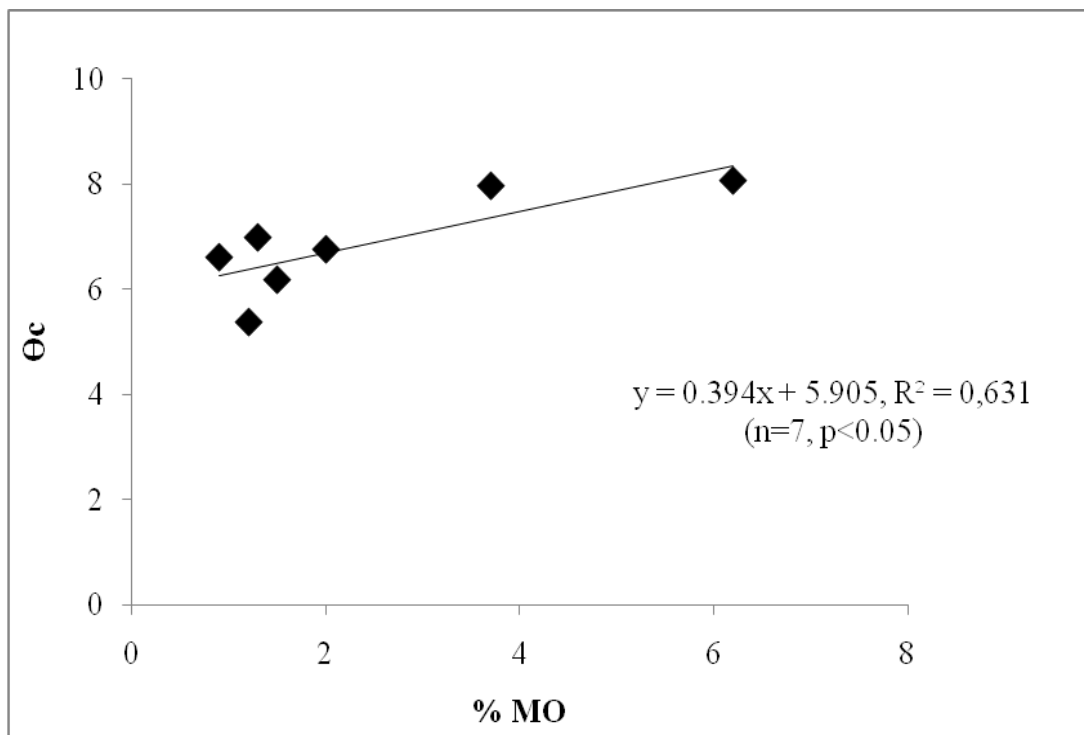


Figura 6. Relación entre el contenido MO (%) y el contenido crítico de agua en el suelo (Θc) para los 7 suelos: BE, CR, AN, FN, FD, OV y LV.

La cantidad de material erosionado varió en función de la altura a la cual se colectó dicho material y según el tipo de suelo. En la figura 7 se puede observar que el modelo exponencial fue el que mejor ajustó para la relación cantidad de material erosionado y altura sobre la superficie del suelo (Tabla 3, $p<0.05$). La mayor diferenciación entre suelos se da a las menores alturas de recolección de material (0 a 11 cm) luego la diferencias tienden a disminuir hasta alcanzar una altura de 28.5 cm donde prácticamente todos los suelos presentan la misma cantidad de material erosionado.

El suelo de LV, que es el suelo de textura más fina (Tabla 1) fue el que menos se erosionó. En los 30 cm de altura muestreados solo se colectó 0.2 g de material, de los cuales el 78 % del material correspondió a los primeros 11.5 cm. En los suelos de texturas

intermedias, OV, FN y FD (franco arenosa) el total de material erosionado fue en promedio de 0.8 g, es decir cuatro veces más que el suelo de textura franca (LV). El 80% de este material erosionado se colectó en los primeros 11.5 cm de altura. Finalmente para

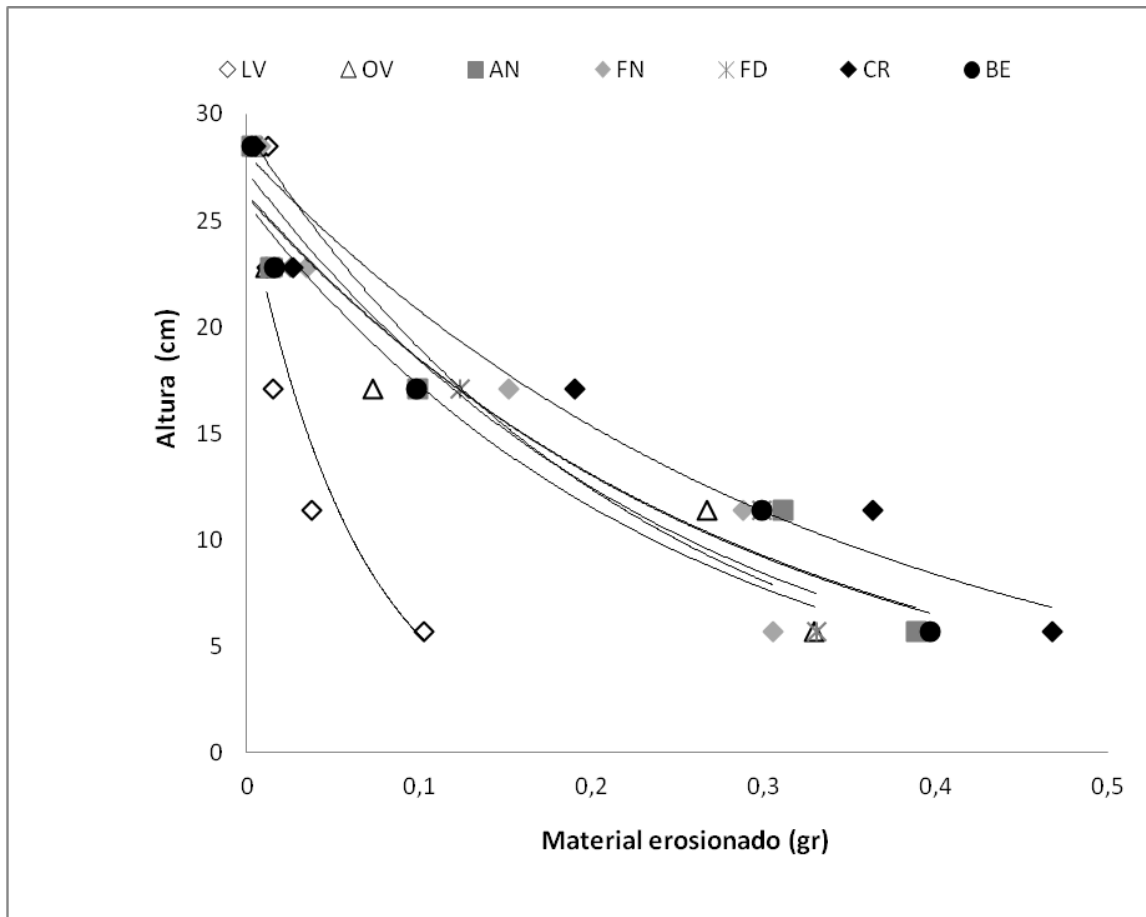


Figura 7. Material erosionado en función de la altura sobre la superficie del suelo a la cual se colectó en 7 suelos diferentes: FD (Facultad degradado), AN (Anguil), OV (Olivillos), CR (Cramer), FN (Facultad natural), BE (Buena Esperanza) y LV (La Victoria).

los suelos de texturas más gruesa BE, CR y AN (arenoso franco) el promedio de material erosionado en los 30 cm de altura fue de 0.9 g de los cuales el 84 % se erosionó en los primeros 11.5 cm de altura. Resultados semejantes fueron encontrados para esta misma región, comparando mediante el uso de colectores de partículas, las tasas de erosión de un Ustipsamment y un Haplustol, donde el material erosionado en el suelo arenoso fue casi 7 veces mayor que el erosionado en el más fino (Aimar *et al.*, 2011).

Si bien en todos los casos el ajuste del material erosionado en función de la altura dio una función exponencial, cada suelo mostró un patrón de erosión diferente, variando las pendientes de la curva. Este comportamiento se debió a que en todos los casos el ensayo se produjo con el suelo seco al aire y dicho contenido de humedad varió de acuerdo a la

Tabla 3. Valor de los coeficientes de regresión existentes entre la cantidad de material erosionado (g) y la altura sobre la superficie del suelo a la cual se colectó en los 7 sitios muestreados: FD (Facultad degradado), AN (Anguil), OV (Olivillos), CR (Cramer), FN (Facultad natural), BE (Buena Esperanza) y LV (La Victoria).

Sitio	Coeficiente de regresión ¹			
	a	b	R ²	n
LV	25.86	-15.45	0.89, p<0.05	5
FN	29.18	-4.29	0.87, p<0.05	5
FD	27.32	-3.93	0.89, p<0.05	5
OV	25.80	-4.03	0.92, p<0.05	5
CR	28.13	-3.03	0.94, p<0.01	5
BE	26.26	-3.50	0.95, p<0.01	5
AN	26.14	-3.46	0.93, p<0.01	5

¹ a y b son los parámetros de ajuste en la regresión de la forma $Y = a e^{-bx}$ donde y = Altura sobre la superficie del suelo (cm) y x es el Material erosionado (g).

textura (Anexo). En LV el Θ inicial fue de 3.5 %, el mayor valor por poseer textura más fina y mayor contenido de MO, por lo cual el inicio de pérdida de suelo fue posterior a los otros suelos, cuyo Θ inicial fue en promedio 2.2 %. Por otro lado, la cantidad de material erosionado al final del tratamiento (3 minutos en todos los casos) reflejó la respuesta del suelo al tiempo de secado, que en LV fue más lento que en los restantes suelos de texturas más gruesas, donde las curvas de ajustes se distanciaron de manera considerable del suelo de LV.

Visualmente también se pudo constatar esta diferencia al observar las etiquetas autoadhesivas que muestran el perfil de erosión en cada suelo. En la Figura 8 se observó 3 perfiles (ver los restantes perfiles en el Anexo) correspondientes a suelos de diferente textura (LV, franco; OV, franco arenoso y AN, arenoso franco). En éste último suelo la mayor acumulación de partículas se observó en los primeros 8.5 cm, luego hasta los 23 cm se observó una disminución gradual en el material erosionado y por encima de ésta altura prácticamente no se visualizaron partículas. En el caso de OV, la mayor concentración se

observa en los primeros 5.6 cm y por encima de esa altura se evidencia una graduación que llega a los 23 cm de altura. En LV la mayor concentración de material se encuentra en los primeros 4 cm, luego comienza a disminuir gradualmente hasta los 30 cm. Es decir, la cantidad de material erosionado disminuyó con la altura en todos los casos. Se observó en los suelos de textura más gruesa, una mayor concentración de material que alcanzó mayor altura en relación a los suelos más finos. Sin embargo, se comprobó que el suelo más fino tuvo un mayor aporte de partículas a mayor altura. Esto se debió a que LV posee una mayor proporción de limos (39.8%), entre 2 y 3 veces del contenido de limos que en los restantes suelos y que corresponde a la fracción más susceptible a ser transportada

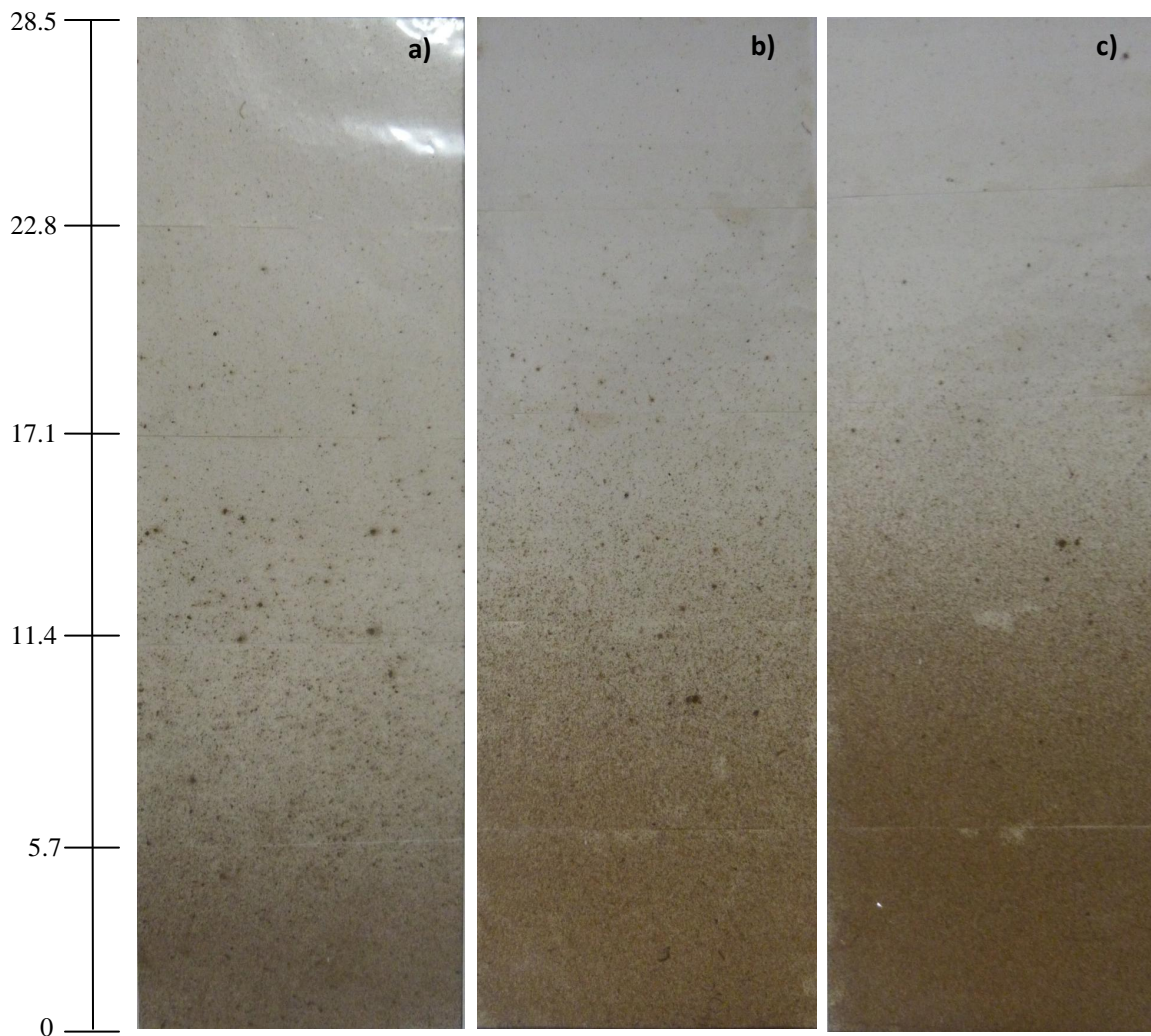


Figura 8. Perfil de erosión en el suelo de: a) La Victoria (LV), b) Olivillos (OV) y c) Anguil (AN). El perfil de altura va de 0 a 28.5 cm desde la superficie del suelo.

por el viento a mayor altura. Se ha demostrado experimentalmente que el material que es transportado en suspensión a diferentes distancias, comúnmente corresponde a la fracción limo y en su mayoría tienen un diámetro cercano a los 20 μm (Pye, 1987). Además se apreció una variación en el color del material erosionado, siendo más oscuro en LV y más claro en AN por su textura más gruesa y menor contenido de MO.

Estos resultados permiten validar la hipótesis 2 ya que se comprobó que suelos de texturas más gruesas se erosionaron más que los suelos de textura fina, y que el Θ inicial de cada suelo tuvo una gran incidencia en dicho comportamiento.

4 CONCLUSIONES

En los 7 suelos analizados La Victoria (LV), Facultad Natural (FN), Facultad Degradado (FD), Olivillos (OV), Buena Esperanza (BE), Cramer (CR) y Anguil (AN) a medida que aumentó la humedad del suelo, menor fue la cantidad de material erosionado en cada uno de los ellos. Es decir que los suelos texturalmente más gruesos son muchos más susceptibles a erosionarse por el viento que suelos de texturas más finas.

Los contenidos críticos de agua del suelo (Θ_c) variaron en función de la textura, correspondiendo el valor más bajo al suelo de textura más gruesa (BE con 5.3 %) y el valor más alto al suelo de textura más fina (LV con 8.1 %).

Existió una relación lineal positiva entre el Θ_c y los contenidos de arcilla (A) y de materia orgánica (MO) que reafirma la importancia que tiene, por un lado, la textura, principalmente la fracción más fina (arcilla) y la MO en la absorción y retención de agua en el suelo y su consecuente efecto sobre la erosión eólica en suelos de regiones semiáridas.

La cantidad de material erosionado varió de manera exponencial y negativa con la altura a la cual se colectó dicho material y según el tipo de suelo. La mayor diferenciación entre suelos se da a las menores alturas de recolección de material (0 a 11 cm) luego las diferencias tienden a disminuir hasta alcanzar una altura de 28.5 cm donde prácticamente todos los suelos presentan la misma cantidad de material erosionado.

Podemos concluir que suelos de texturas más gruesas se erosionaron más que los suelos de textura fina ya que presentan menores valores de Θ_c y que dicho patrón de erosión estuvo fuertemente influenciado por el Θ inicial de cada suelo, el cual depende de la textura, principalmente contenidos de A y de MO. Estos resultados fueron obtenidos bajo condiciones controladas en túnel de viento por lo cual, como línea futura de investigación, los mismos deberían ser validados con mediciones hechas a campo.

5 BIBLIOGRAFIA

- Aimar, S. B.; M. J. Méndez y D. E. Buschiazzo. 2011 Condiciones climáticas y predicción de la erosión eólica potencial con el modelo EWEQ en dos suelos loésicos. *Revista de la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo*. 29(2): 253- 264.
- Aimar, S.B; D.E. Buschiazzo y N. Peinemann. 2003. Cuantificación de la erosión eólica en la Región Semiárida Pampeana Central (RSPC). En: Golberg, A. D. y A. G. Kin. *Viento, suelo y planta*. INTA, 130 pp.
- Azizov, M.T. 1977. Influence of soil moisture on the resistance of soil to wind erosion. *Soviet Soil Sci.* 1:105-108.
- Bagnold R A. 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. Methuen: London: 265.
- Belly, P.Y. 1964. Sand movement of wind. TM. No, US Army Coastal Engineering Research Center, Washington D. C. 80 pp.
- Bisal F. y Hsieh J. 1966. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Science*, 102: 143-146.
- Bolte K, P. Hartman, H. Fleige, R. Horn. 2011. Determination of critical soil water content and matric potential for wind erosion. *Journal Soil Sediments*, 11: 209-220.
- Buschiazzo, D. y V. Taylor. 1993. Efectos de la erosión eólica sobre algunas propiedades del suelo de la Región Semiárida Pampeana Central. *Ciencia del Suelo*. Vol.10/11: 46-53.
- Buschiazzo D. E. y S. B. Aimar. 2003. Erosión Eólica: Procesos y predicción. En: *Viento, Suelo y Planta*. Golberg, Daniel A. y A.G. Kin. Eds. EEA Anguil, Ing. Agr. Guillermo Covas y Fac. De Agronomía, UNLPam. Ediciones INTA. Pp 23-34.
- Buschiazzo, D.E; J.E. Panebianco; G. Guevara; J. Rojas; J.J. Zurita; D. Bran; D. López; J. Gaitán y P. Hurtado. 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 (Argentina)*. Vol. 27(2): 255-260
- Charlson, R. J., Langner, J., Rodhe, H., Leovy, C. B., and Warren, S. G. 1991. Perturbation of the Northern Hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols, *Tellus A-B*, 43, 152–163.

- Chen W., Dong Z, Li Z, y Yang Z. 1996. Wind tunnel test of the influence of moisture on the erodability of loessial sandy loam soils by wind. *Journal of Arid Environments*, 34: 391-402.
- Chepil, W.S. 1945. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Sci.* 60: 305-332.
- Chepil, W.S. 1956. Influence of moisture on erodibility by wind. *Soil Sci. Soc. Am Proc.* 20: 288-292.
- Chepil, W.S. 1958. Soil conditions that influence wind erosion. USDA Tech. Bull No. 1185. Washington. D.C.
- Chepil, W.S y N.P. Woodruff. 1963. The physics of wind erosion and its control. *Advances in Agronomy* 15: 211-302.
- Cornelis, WM y Gabriels D. 2003. The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand by wind: An evaluation of selected models. *Sedimentology* 50: 771-790.
- Cornelis, WM, Gabriels D y Hartman R. 2004. A conceptual model to predict the deflation threshold shear velocity as affected by near-surface soil water: 1. Theory. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1154-1161.
- Cornelis, WM, Gabriels D y Hartman R. 2004. A conceptual model to predict the deflation threshold shear velocity as affected by near-surface soil water: 2. Calibration and Verification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1162-1168.
- de Oro L. A. y Buschiazzo D.E. 2009. Threshold wind velocity as an index of soil susceptibility to wind erosion under variable climatic conditions. *Land Degradation and Development*. Reino Unido. 20: 14-21.
- Dregne H.E. 1986. Desertification of arid lands. In: *Physics of Desertification*, El-Baz F, Hassan MHA (eds). Martinus, Nijhoff: Dordrecht, Netherlands, 16pp.
- Fecán F, Marticorena B y Bergametti G. 1999. Parametrization of the increase of the eolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semiarid areas. *Annale Geophysicae* 17: 149-157.
- Fryrear DW, Ali Saleh JD, Bilbro HM, Schomberg JE y Zobeck TM. 1998. Revised Wind Erosion Equation (RWEQ). Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory. Technical Bulletin N° 1.

- Gabel, D. 1993. Einfluss vulkanischer Asche und Nützung auf die Böden der semiariden Pampa Argentinens. Diplomarbeit von D. Gabel Allgemeine Agrarwissenschaften. Universität Hohenheim. Stuttgart, pp 99.
- Gillette, D.A. y T.R. Walker. 1977. Characteristics of airborne particles produced by wind erosion of sandy soil, high plains of West Texas. *Soil Sci.* 123: 97-110.
- Hagen, L.J. 1991. A wind erosion prediction system to meet users needs. *J. Soil Water Conserv.* 46: 106-111.
- Herut, B., Nimmo, M., Medway, A., Chester, R., and Krom, M.D. 2001. Dry atmospheric inputs of trace metals at the Mediterranean coast of Israel (SE Mediterranean): Sources and fluxes, *Atmos. Environ.*, 35, 803–813.
- Lyles, L. 1988. Basic wind erosion processes. *Agric. Ecosystems Environ.* 22/23: 91-101.
- Lyles, L. y J. Tatarko. 1986. Wind erosion effects on soil texture and organic matter. *J. Soil Water Conserv.* 41(3): 191-193.
- McKenna-Neuman, C y W.G Nickling. 1989. A theoretical and wind tunnel investigation of the effect of capillary water on the entrainment of sediment by wind. *Canadian J Soil Sci.* 69: 79-96.
- Mendez, M.J; L de Oro; J.E Panebianco; J.C Colazo y D.E Buschiazzo. 2006. Organic carbon and nitrogen in soils of semiarid Argentina. *J. Soil Water Conserv.* 61(4): 230-235.
- Nickling W.G. 1978. Eolian sediment transport during dust storms: Slims River Valle, Yukon Territory. *Canada Journal of Earth Science*, 15:1069-1084.
- Panebianco, J.E. y D.E. Buschiazzo. 2008. Wind erosion predictions with the Wind Erosion Equation (WEQ) using different climatic factors. *Land Degradation and Development.* 19: 36–44.
- Papendick, R.I. 1998. Farming with the wind: Best management practices for controlling wind erosion and air quality on Columbia Plateau croplands. Washington State University College of Agriculture and Home Economics, Misc. Pub. MISC0208.
- Pope, C.A.; D.V. Bates y M.E. Raizenne. 1996. Health effects of particulate air pollution: time for reassessment?. *Env. Health Perspect.* 103: 472-480.

- Porta Casanellas, J; Lopez-Acevedo Reguerin M. y C. Roquero de Laburu. 2003. "Edafología: para la agricultura y el medio ambiente". Ed. Mundi-Prensa, 3^o Edición. Pp. 929.
- Pye, K. 1987. Aerolian dust and dust deposits. London, Academic Press. 333 pp.
- Ravi, S., P. D'odorico, T.M., Over y TM, Zobeck. 2004. On the effect of air humidity on soil susceptibility to wind erosion: The case of air-dry solis. Geophysical research Letters 31: L09501 10.1029/ 2004GL019485.
- Ravi, S., T.M., Zobeck, T.M., Over, G.S., Okin y P., D'odorico. 2006. On the effect of moisture bonding forces in ari-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion. Sedimentology 53: 597-609.
- Redmond, H.E., Dial, K.D., Thompson, Jonathan E., 2000. Light scattering and absorption by wind blown dust: Theory, measurement, and recent data. Aeolian Research 2, 5–26.
- Saleh, A. y D.W., Fryrear.1995. Threshold wind velocities of wet soils as affected by wind blown sand. Soil Sci. 160: 304-309.
- Saleh, A. y D.W., Fryrear.1997. Soil roughness for the revised wind erosion equation (RWEQ). Citado en 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.
- 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.
- Woodruff, N.P y F.H Siddoway. 1965. A wind erosion equation. Soil Sci. Am. Proc. 29 (5): 602-608.
- Yu, S., Zender, C. S., and Saxena, V. K. 2001. Direct radiative forcing and atmospheric absorption by boundary layer aerosols in the south-eastern US: Model estimates on the basis of new observations, Atmos. Environ., 35, 3967–3977.

6 ANEXOS

A-1

Resultados de las simulaciones con túnel de viento para los sitios OV, AN, FN, FD, CR, BE y LV.

Fecha	Altura cm	N ° Tarjeta	Nº Tarro Hum	Tiempo	Tiempo sensit	RPM	Velocidad Anemometro	Velocidad Sensor	Humedad Suelo (%)	HR suelo (%)	Peso tara tarjeta (g)	Peso tarjeta suelo (g)	Peso suelo (g)	Suelo
09/02/2011	5,7-28,5	1--5	232-34	09:36:38	09:36:38	3700	10,5	12,2	2,4	22,42990654	0,5596	0,8892	0,3296	OV
09/02/2011	5,7	6	92-197	10:00:58	10:03:58	3700	10,5	12,2	3,2	29,90654206	0,5615	0,8536	0,2921	OV
09/02/2011	5,7	7	80-168	10:19:51	10:22:51	3700	10,5	12,2	3,7	34,57943925	0,5650	0,8274	0,2624	OV
09/02/2011	5,7	8	124-187	10:56:15	10:56:15	3700	10,5	12,2	4,2	39,25233645	0,5602	0,8042	0,2440	OV
09/02/2011	5,7	9	16-210	11:27:19	11:30:19	3700	10,5	12,2	5,2	48,59813084	0,5643	0,6735	0,1092	OV
09/02/2011	5,7	10	35 - 32	11:49:58	11:52:58	3700	10,5	12,2	5,8	54,20560748	0,5558	0,5956	0,0398	OV
10/02/2011	5,7-28,5	1 -- 5	100 - 99	09:44:17	09:47:17	3700	10,5	12,2	2,4	26,96629213	0,5548	0,9434	0,3886	AN
10/02/2011	5,7	6	198 - 185	10:08:57	10:08:57	3700	10,5	12,2	3	33,70786517	0,5515	0,8956	0,3441	AN
10/02/2011	5,7	7	181 - 86	10:27:44	10:30:44	3700	10,5	12,2	3,6	40,4494382	0,5607	0,8845	0,3238	AN
10/02/2011	5,7	8	194 - 60	10:43:29	10:46:29	3700	10,5	12,2	4,1	46,06741573	0,5596	0,8822	0,3226	AN
10/02/2011	5,7	9	33- 141	11:17:42	11:20:42	3700	10,5	12,2	5	56,17977528	0,5624	0,8073	0,2449	AN
10/02/2011	5,7	10	168- 92	11:37:42	11:40:42	3700	10,5	12,2	5,6	62,92134831	0,5605	0,7393	0,1788	AN
10/02/2011	5,7	11	144- 145	11:54:52	11:57:52	3700	10,5	12,2	6,1	68,53932584	0,5572	0,5675	0,0103	AN
14/02/2011	5,7-28,5	1 -- 5	197 - 16	09:51:43	09:54:43	3700	10,5	12,2	2,1	10,76923077	0,5574	0,8628	0,3054	FN
14/02/2011	5,7	6	124 - 232	10:18:40	10:21:40	3700	10,5	12,2	2,6	13,33333333	0,5553	0,8458	0,2905	FN
14/02/2011	5,7	7	80 - 210	10:50:30	10:53:30	3700	10,5	12,2	3,5	17,94871795	0,5621	0,8337	0,2716	FN
14/02/2011	5,7	8	32 - 35	11:04:55	11:07:55	3700	10,5	12,2	4,3	22,05128205	0,5549	0,815	0,2601	FN
14/02/2011	5,7	9	34- 187	11:23:48	11:26:48	3700	10,5	12,2	5,1	26,15384615	0,5579	0,7958	0,2379	FN
14/02/2011	5,7	10	127- 240	11:38:51	11:41:51	3700	10,5	12,2	5,9	30,25641026	0,56	0,6786	0,1186	FN
14/02/2011	5,7	11	143- 152	12:09:39	12:12:39	3700	10,5	12,2	6,3	32,30769231	0,5554	0,6043	0,0489	FN
15/02/2011	5,7-28,5	1 -- 5	198- 168	09:31:19	09:34:19	3700	10,5	12,2	2,4	25,53191489	0,5565	0,887	0,3305	FD
15/02/2011	5,7	6	181 - 100	09:52:11	09:55:11	3700	10,5	12,2	3,1	32,9787234	0,5588	0,8375	0,2787	FD
15/02/2011	5,7	7	142 - 188	10:12:18	10:15:18	3700	10,5	12,2	3,9	41,4893617	0,5563	0,8115	0,2552	FD
15/02/2011	5,7	8	141 - 194	10:33:22	10:36:22	3700	10,5	12,2	4,6	48,93617021	0,562	0,8076	0,2456	FD
15/02/2011	5,7	9	144 - 92	10:50:47	10:53:47	3700	10,5	12,2	5,2	55,31914894	0,5598	0,6418	0,082	FD
15/02/2011	5,7	10	33 - 86	11:08:25	11:11:25	3700	10,5	12,2	5,9	62,76595745	0,5624	0,5842	0,0218	FD
16/02/2011	5,7-28,5	1 -- 5	80 - 185	10:39:54	10:42:54	3700	10,5	12,2	1,9	24,05063291	0,5514	1,0188	0,4674	CR
16/02/2011	5,7	6	127 - 152	10:58:39	11:01:39	3700	10,5	12,2	2,7	34,17721519	0,5552	0,9983	0,4431	CR
16/02/2011	5,7	7	99 - 187	11:17:23	11:20:23	3700	10,5	12,2	3,4	43,03797468	0,5558	0,9945	0,4387	CR
16/02/2011	5,7	8	143 - 232	11:31:19	11:34:19	3700	10,5	12,2	4,3	54,43037975	0,5567	0,954	0,3973	CR
16/02/2011	5,7	9	60 - 143	11:44:42	11:47:42	3700	10,5	12,2	5,2	65,82278481	0,5644	0,6495	0,0851	CR
16/02/2011	5,7	10	210 - 124	12:12:49	12:15:49	3700	10,5	12,2	5,6	70,88607595	0,5607	0,5848	0,0241	CR
17/02/2011	5,7-28,5	1 -- 5	33 - 92	10:01:16	10:04:16	3700	10,5	12,2	1,9	24,05063291	0,5628	0,9593	0,3965	BE
17/02/2011	5,7	6	144- 142	10:23:49	10:26:49	3700	10,5	12,2	2,8	35,44303797	0,5638	0,9174	0,3536	BE
17/02/2011	5,7	7	141 - 194	10:38:47	10:41:47	3700	10,5	12,2	3,3	41,7721519	0,5618	0,8681	0,3063	BE
17/02/2011	5,7	8	100 - 86	11:01:09	11:04:09	3700	10,5	12,2	3,9	49,36708861	0,5553	0,8551	0,2998	BE
17/02/2011	5,7	9	197 - 168	11:18:57	11:21:57	3700	10,5	12,2	4,9	62,02531646	0,5544	0,6003	0,0459	BE
17/02/2011	5,7	10	198 - 181	11:35:50	11:38:50	3700	10,5	12,2	5,2	65,82278481	0,5594	0,5809	0,0215	BE
17/12/2012	5,7-28,5	1--5	50-2-25	12:05:48	12:05:51	3700	10,5	12,2	2,1	11,66666667	0,5541	0,6407	0,0866	LV
17/12/2012	5,7	6	58-57-55	12:48:30	12:48:32	3700	10,5	12,2	2,3	12,77777778	0,5533	0,7081	0,1548	LV
18/12/2012	5,7	7	270-116-45	10:35:30	10:35:32	3700	10,5	12,2	2,7	15	0,4874	0,5753	0,0879	LV
20/12/2012	5,7	8	58-57-55	11:10:41	11:10:44	3700	10,5	12,2	3,1	17,22222222	0,4926	0,583	0,0904	LV
20/12/2012	5,7	9	100-261-56	11:55:10	11:55:13	3700	10,5	12,2	3,6	20	0,4958	0,6231	0,1273	LV
20/12/2012	5,7	10	11-110-240	12:35:10	12:35:14	3700	10,5	12,2	4,1	22,77777778	0,4993	0,6018	0,1025	LV
20/12/2012	5,7	11	270-116-45	13:21:15	13:21:20	3700	10,5	12,2	4,8	26,66666667	0,4926	0,6172	0,1246	LV
20/12/2012	5,7	12	50-2-25	13:57:40	13:57:45	3700	10,5	12,2	5,7	31,66666667	0,4959	0,5424	0,0465	LV

A-2

Ecuaciones para la relación lineal entre el material erosionado y la humedad relativa, valores de R^2 , n, p. Cálculos de humedad relativa crítica y de contenido de agua crítico (Θ_c) para cada sitio.

SITIO	FUNCION	R^2	n	p	a	b	y	x^a	H. Equivalente	Θ_c^b
LV	$y = -0,005x + 0,224$	0,756	5	0,05	-0,005	0,224	0	44,8	18	8,07
BE	$y = -0,0010x + 0,681$	0,888	6	0,01	-0,001	0,681	0	68,1	7,9	5,38
FN	$y = -0,011x + 0,449$	0,803	7	0,01	-0,011	0,449	0	40,8	19,5	7,96
CR	$y = -0,0010x + 0,783$	0,794	6	0,01	-0,001	0,783	0	78,3	7,9	6,18
OV	$y = -0,009x + 0,569$	0,946	6	0,01	-0,009	0,569	0	63,2	10,7	6,76
AN	$y = -0,008x + 0,629$	0,843	7	0,01	-0,008	0,629	0	78,6	8,9	6,99
FD	$y = -0,008x + 0,563$	0,863	6	0,01	-0,008	0,563	0	70,4	9,4	6,62

Referencias. a): corresponde al valor de Humedad Relativa crítica. b): Contenido crítico de agua en el suelo (Θ_c) calculado con la ecuación $\Theta_c = (x \cdot HE) / 100$, donde Θ_c = Contenido crítico de agua en el suelo, x = Humedad relativa crítica y HE = Humedad equivalente.

A-3

Resultados de humedad relativa del suelo y peso de suelo (gr) colectado para cada sitio.

SITIO	HR Suelo (%)	Peso Suelo (gr)	SITIO	HR Suelo (%)	Peso Suelo (gr)	SITIO	HR Suelo (%)	Peso Suelo (gr)
AN	26,96629213	0,3886	FD	25,53191489	0,3305	OV	22,42990654	0,3296
	33,70786517	0,3441		32,9787234	0,2787		29,90654206	0,2921
	40,4494382	0,3238		41,4893617	0,2552		34,57943925	0,2624
	46,06741573	0,3226		48,93617021	0,2456		39,25233645	0,244
	56,17977528	0,2449		55,31914894	0,082		48,59813084	0,1092
	62,92134831	0,1788		62,76595745	0,0218		54,20560748	0,0398
	68,53932584	0,0103						
FN	10,76923077	0,3054	BE	24,05063291	0,3965	CR	24,05063291	0,4674
	13,33333333	0,2905		35,44303797	0,3536		34,17721519	0,4431
	17,94871795	0,2716		41,7721519	0,3063		43,03797468	0,4387
	22,05128205	0,2601		49,36708861	0,2998		54,43037975	0,3973
	26,15384615	0,2379		62,02531646	0,0459		65,82278481	0,0851
	30,25641026	0,1186		65,82278481	0,0215		70,88607595	0,0241
	32,30769231	0,0489						
LV	12,77777778	0,1548						
	20	0,1273						
	22,77777778	0,1025						
	26,66666667	0,1246						
	31,66666667	0,0465						

A-4

Resultados obtenidos de contenido de agua crítico del suelo (Θ_c) y valores de Limo+Arcilla y MO para cada sitio.

SITIO	Θ_c	L+A	MO
BE	5,38	18,98	1,2
CR	6,18	19,49	1,5
AN	6,99	21,85	1,3
OV	6,76	26,25	2
FD	6,62	25,80	0,9
FN	7,96	37,97	3,7
LV	8,07	57,90	6,2

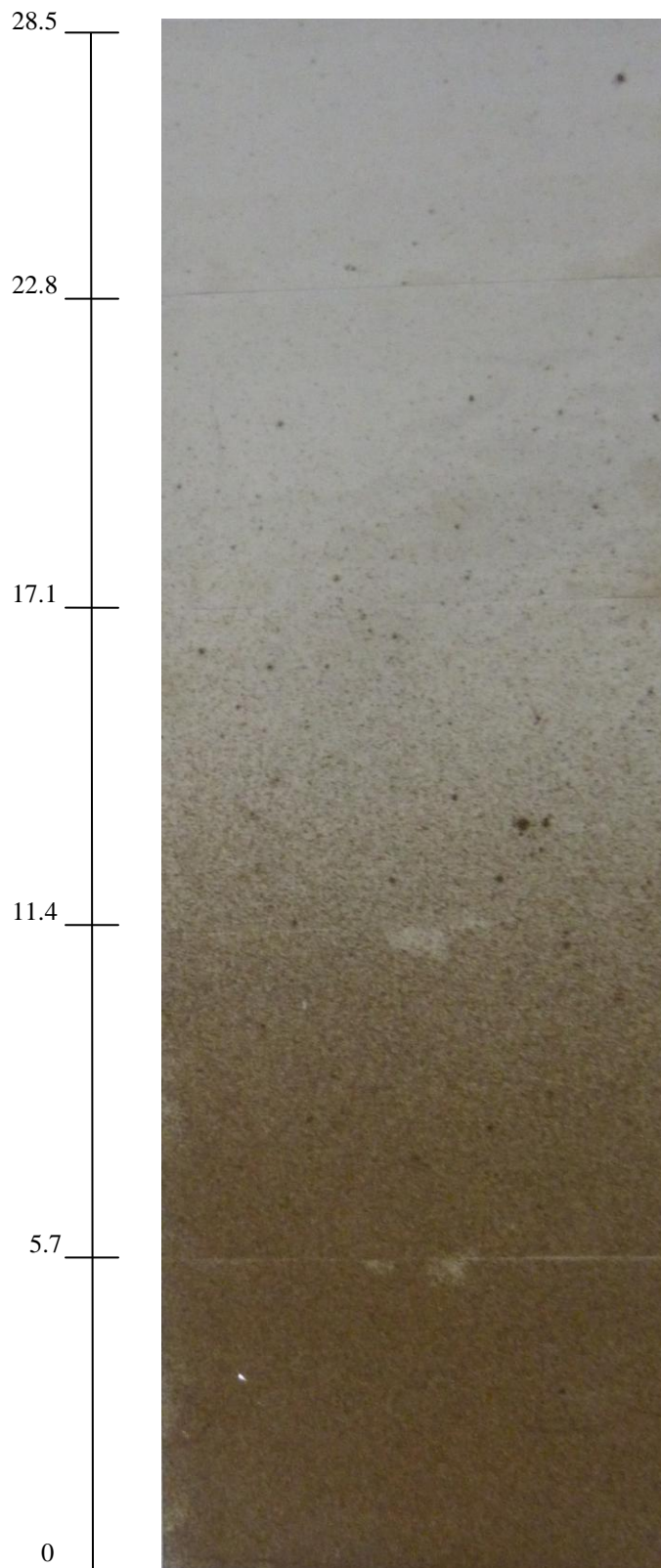
A-5

Altura de recolección del material erosionado en cm y peso de material erosionado en g para cada sitio.

Altura (cm)	Peso LV	Peso OV	Peso AN	Peso FN	Peso FD	Peso CR	Peso BE
0 - 5,7	0,102575	0,3296	0,3886	0,3054	0,3305	0,4674	0,3965
5,7 - 11,4	0,0379375	0,2673	0,3115	0,2879	0,2988	0,3634	0,2993
11,4 - 17,1	0,0152125	0,0733	0,0995	0,1517	0,1235	0,1901	0,0983
17,1 - 22,8	0,011475	0,011	0,0136	0,0347	0,0206	0,0272	0,016
22,8 - 28,5	0,012342857	0,0052	0,0032	0,0083	0,0035	0,0054	0,0033

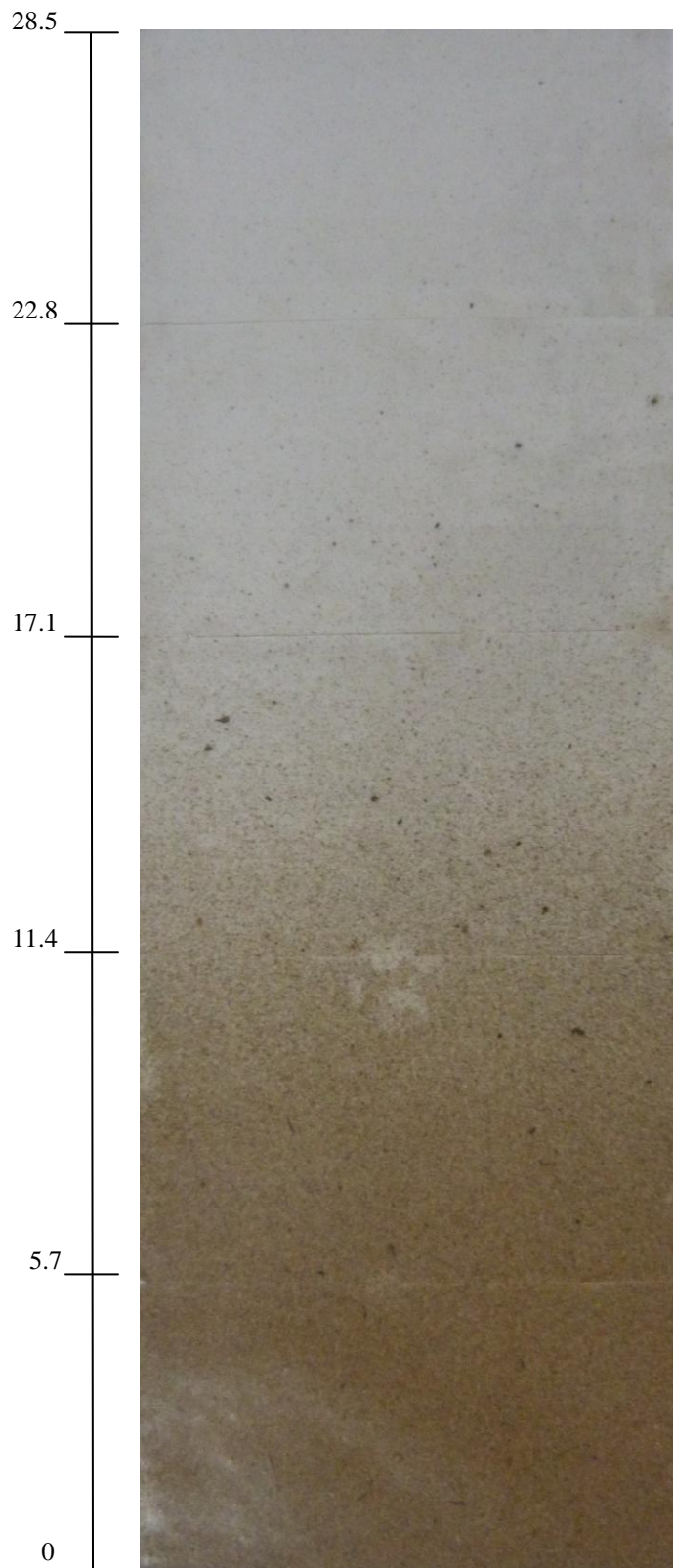
A-6

Foto del material erosionado en función de la altura (cm) para el sitio de Anguil (AN).



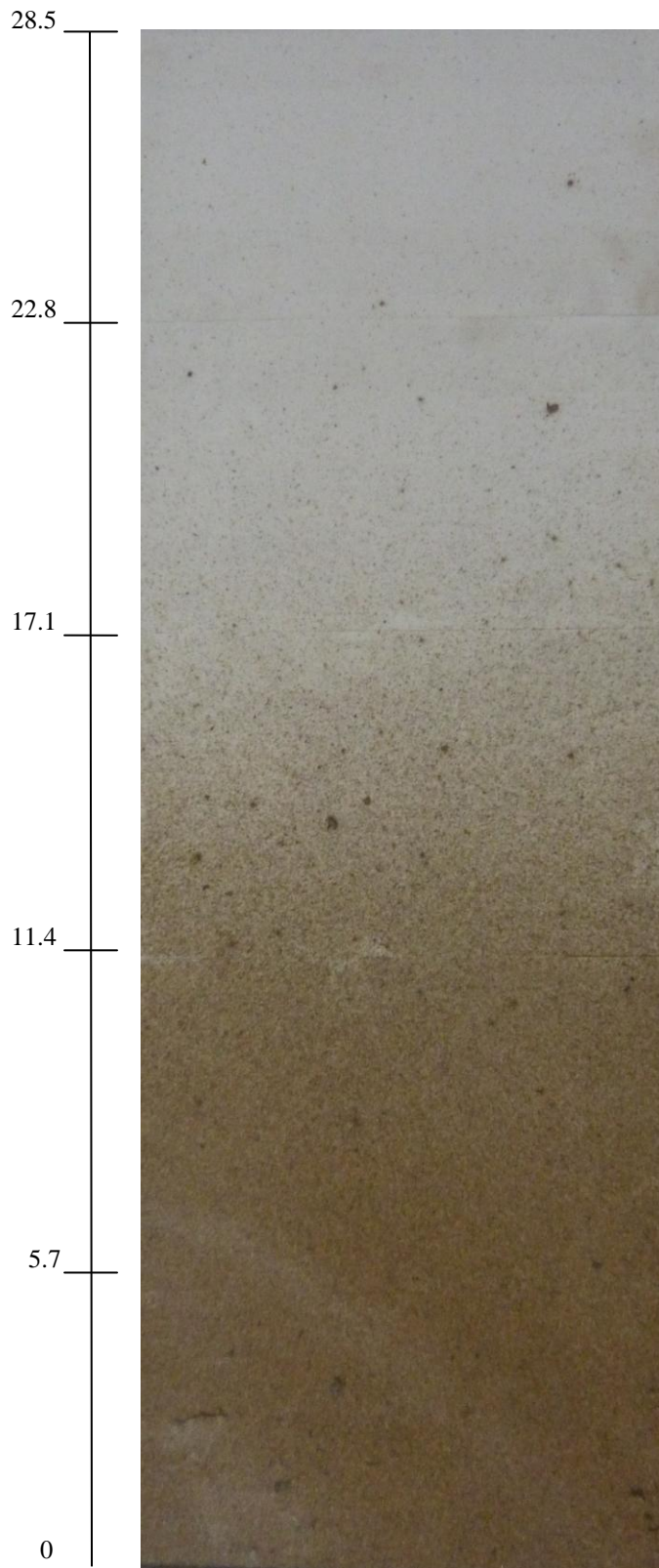
A-7

Foto del material erosionado en función de la altura (cm) para el sitio de Buena Esperanza (BE).



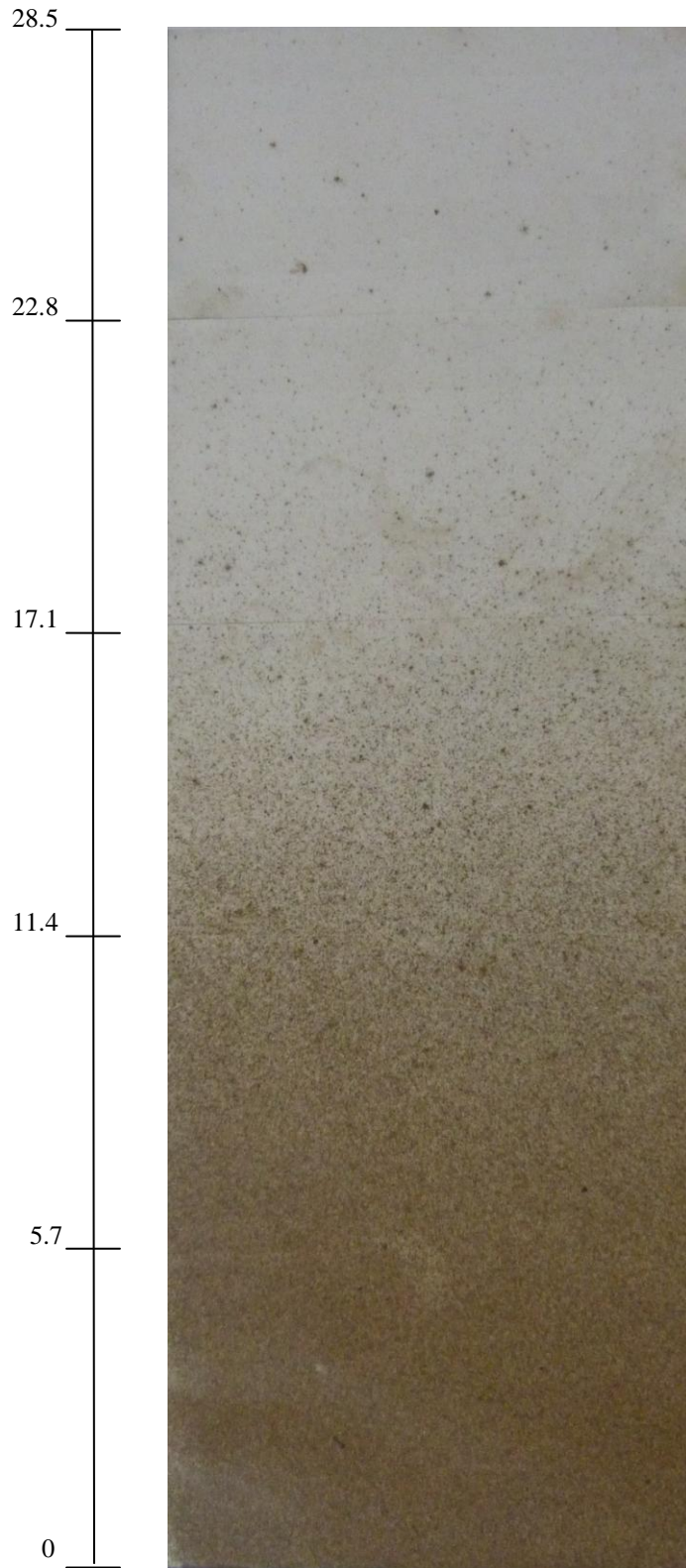
A-8

Foto del material erosionado en función de la altura (cm) para el sitio de Cramer (CR).



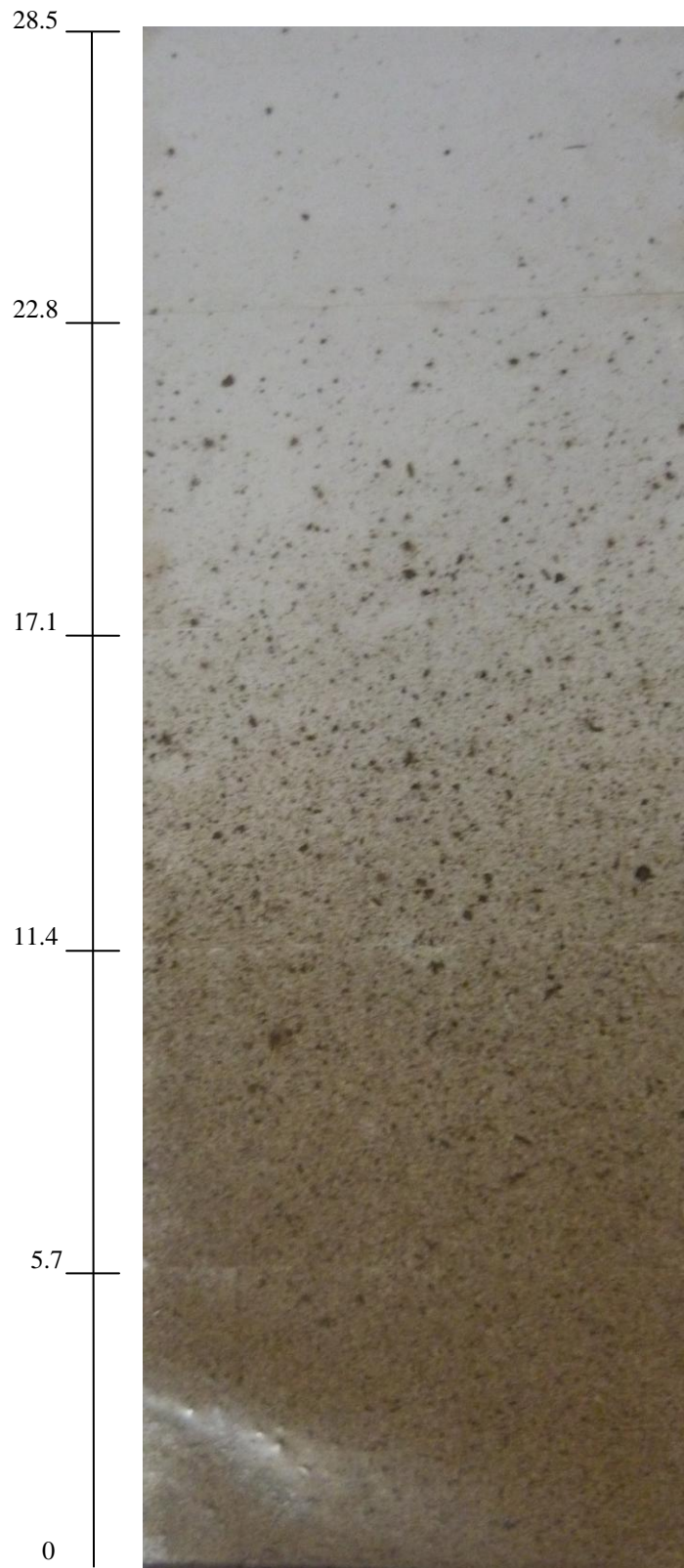
A-9

Foto del material erosionado en función de la altura (cm) para el sitio de Facultad Degradado (FD).



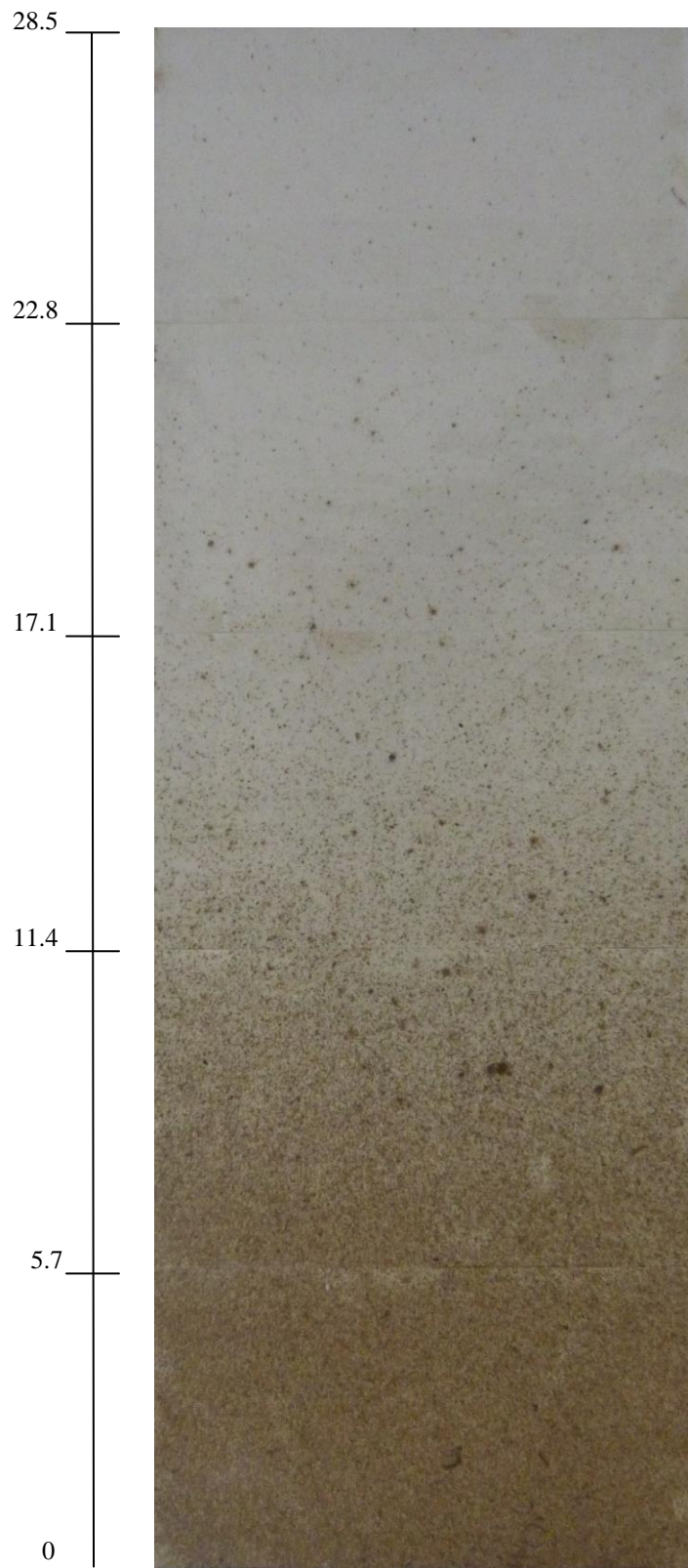
A-10

Foto del material erosionado en función de la altura (cm) para el sitio de Facultad Natural (FN).



A-11

Foto del material erosionado en función de la altura (cm) para el sitio de Olivillos (OV).



A-12

Foto del material erosionado en función de la altura (cm) para el sitio de La Victoria (LV).

