



Universidad Nacional del Sur

TESIS DE DOCTOR EN AGRONOMIA

**RUGOSIDAD SUPERFICIAL Y
EROSIÓN EÓLICA EN SUELOS DE LA
REGIÓN SEMIÁRIDA PAMPEANA
CENTRAL ARGENTINA (RSPC).**

Ing. Laura Andrea de Oro

Bahía Blanca
Argentina

2010

PREFACIO

Esta tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Agronomía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta universidad u otras. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo por la tesista, en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa y en el Campo Experimental de INTA Anguil durante el período comprendido entre 2005 y 2010 bajo la dirección del Dr. Daniel Eduardo Buschiazzo.

Laura Andrea de Oro



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/...../..... , mereciendo la calificación de(.....)

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Daniel Buschiazzo por su dirección y asistencia durante el curso de este estudio y su colaboración en la escritura y corrección de esta tesis.

Agradezco a las siguientes personas que me asistieron con los trabajos de campo en la Facultad de Agronomía y en la estación experimental de INTA Anguil: señor Abel Parodi (Laboratorista de la Facultad de Agronomía de la UNLPam.), señor Juan Cruz Colazo (Ing. Agrónomo), Santiago Augustus (tesista de grado), personal de la estación experimental Agropecuaria INTA Anguil y por último, en especial, a mi hermana y a mi papa que sin estar relacionados con el tema colaboraron con los trabajos de campo. También deseo agradecer al señor Guillermo Casagrande (Ing. Agrónomo) por brindarme datos climáticos utilizados en este trabajo y a la Ing. Adriana Gili por su valiosa colaboración en la evaluación estadística.

Agradezco a la Facultad de Agronomía de la UNLPam., por facilitarme los instrumentos para desempeñar mi trabajo y al CONICET por financiar este estudio.

Finalmente quiero agradecer muy especialmente a mi familia por el estímulo y apoyo permanente que me brindaron, haciendo posible la concreción de esta tesis y en particular a mi esposo Celso por su tolerancia y consideración. Este trabajo esta dedicado a mi hijito Benicio que iluminó mi vida en el último período de desarrollo de esta tesis.

RESUMEN

La erosión eólica es uno de los procesos de degradación de suelo más importantes en las regiones áridas y semiáridas del mundo. Entre otros factores, la velocidad del viento es uno de los que la desencadenan y la rugosidad de la superficie del suelo uno de los que la controlan. Esta tesis tuvo por objetivos determinar las velocidades umbrales (velocidad que inicia el proceso de erosión) en distintas épocas del año en la Región Semiárida Pampeana Central (RSPC) y evaluar el efecto de la rugosidad de la superficie del suelo sobre la erosión. El primer objetivo permitió definir épocas del año con distintos riesgos de erosión y el segundo, evaluar la validez de los modelos existentes por medio de los cuales es posible calcular la tasa de degradación de la rugosidad de la superficie del suelo en función de las lluvias y la magnitud de la erosión en función de la rugosidad superficial. A tal fin se llevaron a cabo estudios de la magnitud de la velocidad umbral, de la degradación de la rugosidad en función de las lluvias y de los efectos de la rugosidad sobre la erosión en un Haplustol éntico y un Ustipsamment típico de la RSPC. Los estudios de rugosidad se llevaron a cabo para tres herramientas de labranza: arado de rastra (DT), sembradora lister (LB) y sembradora grano fino (DH).

Los resultados muestran que la velocidad umbral de viento (μt) fue menor en invierno (6.10 m s^{-1}), intermedia en primavera y verano (8.22 y 8.28 m s^{-1} respectivamente) y mayor en otoño (26.48 m s^{-1}). Estas diferencias estuvieron relacionadas con variaciones de la velocidad del viento, de las precipitaciones, la temperatura y la humedad relativa, factores que influyen sobre las condiciones de la superficie del suelo, produciendo una alta intermitencia en la actividad de saltación. En otoño las condiciones ambientales no favorecen la ocurrencia de

erosión eólica pero todo lo contrario ocurre en primavera, verano e invierno.

El valor de μt que debería usarse en los modelos de predicción de la erosión eólica para suelos de la RSPC, 7.53 m s^{-1} , resultó ser superior al utilizado por RWEQ (5 m s^{-1}) e inferior a la WEPS (8 m s^{-1}).

La degradación de la rugosidad orientada (ORR) fue variable entre herramientas de labranza, el tipo de suelo y la cantidad de lluvia. En el suelo más estructurado (Haplustol) ORR fue altamente dependiente de su valor inicial, siendo menor cuando mayor fue éste valor. En el suelo menos estructurado (Ustipsamment) todas las rugosidades, independientemente de su valor inicial, se degradaron casi totalmente por efecto de la lluvia. Por otra parte, la degradación de la rugosidad no orientada, (RRR) dependió de las propiedades intrínsecas del suelo, principalmente textura y estructura.

El efecto de la cantidad de lluvia (CUMR) y energía de la lluvia (CUMEI) sobre ORR varió, nuevamente, en función de la altura inicial de los camellones, siendo éstos más estables cuando mayor fue su altura inicial y en el suelo con mayor agregación. En cambio, la variación de RRR en función de CUMR y CUMEI, en ambos suelos, fue similar para todas las herramientas de labranza, siendo mayor sobre los agregados y pseudo-agregados (*clods*) del suelo más arenoso (Ustipsamment) que los del franco arenoso (Haplustol) que resultaron más estables.

Las ecuaciones del modelo RWEQ para calcular ORR y RRR subestimaron los valores medidos. En el caso de ORR la incorporación al modelo de algún parámetro complementario que represente el valor de rugosidad orientada (K_r) inicial mejorará las estimaciones, mientras que en el caso de RRR cuando menor fue la degradación de la rugosidad no orientada

(Crr) mejor predijo el modelo, confirmando que el Haplustol fue el suelo menos degradado.

Las ecuaciones $Y = 41.33x^{-0.72}$ ($R^2 = 0.86$, $p < 0.001$) para el Haplustol y $Y = 46.24x^{-0.27}$ ($R^2 = 0.58$, $p < 0.001$) para el Ustipsamment permitirían predecir la degradación relativa de Kr simplemente conociendo su valor inicial para cualquier magnitud de lluvia.

La mayoría de las rugosidades simuladas (K' de 0 a 0.85) lograron disminuir la erosión relativa entre un 20 y un 80 % con respecto al tratamiento sin rugosidad (PR), en ambos suelos.

La incidencia de Crr sobre el factor de rugosidad (K') fue relativamente baja en ambos suelos: Crr controló, como máximo, un 12% de la erosión relativa en el Haplustol y sólo un 5% en el Ustipsamment, resultado que guarda relación con la mejor agregación del Haplustol. Estos resultados permiten deducir que es posible utilizar solamente a la rugosidad orientada, a fin de evaluar los efectos de la rugosidad sobre las tasas de erosión en los suelos estudiados. Por esta razón, se propuso utilizar la altura de los camellones como una medida simplificada de K' en los modelos de predicción de la erosión eólica.

Los mayores esfuerzos para controlar la erosión deberán concentrarse en las épocas del año más críticas, que son primavera, verano e invierno. En estas estaciones será indispensable mantener los suelos con cierta rugosidad para evitar su erosión, principalmente en el Ustipsamment, que presentó mayor susceptibilidad. Será necesario considerar las alturas adecuadas de los camellones para cada tipo de suelo a fin de aumentar la eficiencia del control de la erosión eólica, ya que camellones que superan cierta altura pueden

incrementar la erosión inclusive con respecto a superficies planas.

SUMMARY

Wind erosion is one of the most important soil degradation processes in arid and semiarid regions of the world. Among others, wind speed is one of the most important promoting factors of this process, while the soil surface roughness is one of the most important controlling factors. The objectives of this thesis were to determine the threshold wind velocity (speed that initiates erosion) at different times of the year in the Central Semiarid Pampas Region (RSPC), and to evaluate the effect of the soil surface roughness on wind erosion amounts. The first objective allowed the identification of wind erosion risks along the year and the second the evaluation of the performance of the available wind erosion prediction models to quantify the degradation of the soil surface roughness as a function of rainfall amounts. For this purpose studies of the magnitude of the threshold velocity, of the soil surface roughness degradation rate, and of the relationships between wind erosion and soil roughness were carried out in an Entic Haplustoll and a Typic Ustipsamment of the RSPC. Roughness studies were developed on three tillage tools: disk tandem (DT), a lister-bedder (LB) and a drill-hoe (DH).

Results showed that the threshold wind velocity (μ_t) was lower in winter (6.10 m s^{-1}), medium in spring and summer (8.22 and 8.28 m s^{-1} , respectively) and highest in autumn (26.48 m s^{-1}). These differences were related to changes in wind speeds, precipitation, temperature and relative humidity, factors that influence the conditions of the soil surface, producing a high intermittent saltation activity. The environmental conditions of the autumn do not favor the occurrence of wind erosion but the opposite occurs in the other seasons.

The obtained yearly averaged μ_t value was 7.53 m s^{-1} . This value, that

should be used in the predictive models of wind erosion for soils of the RSPC, was higher than the used by RWEQ (5 m s^{-1}) and lower than the used by WEPS (8 m s^{-1}).

The degradation of the oriented roughness (ORR) differed between tillage tools, soil type and rainfall. In the best structured soil (Haplustoll) ORR was highly dependent on its initial value, being lower with increasing initial heights. In the less structured soil (Ustipsamment) both roughnesses, regardless of their initial values, were degraded almost entirely by rain water. The degradation of the random roughness (RRR) depended on the intrinsic properties of the soil, mainly texture and structure.

The effect of rain amounts (CUMR) and rain energy (CUMEI) on ORR also depended on the initial height of the ridges, the latter being more stable with higher initial heights and in the best structured soil. The variation of RRR as a function of CUMEI and CUMR were similar in all tillage tools in both soils, being higher on the Ustipsamment than in the Haplustoll.

The equations that in RWEQ calculate RRR and ORR, underestimated their values. Therefore, the incorporation of the initial K_r (oriented roughness) values in the model can improve the estimates of ORR, while RRR predictions will be better only for low random roughness values. The equations $y = 41.33 x^{-0.72}$ ($R^2 = 0.86$, $p < 0.001$) for the Haplustoll and $Y = 46.24 x^{-0.27}$ ($R^2 = 0.58$, $p < 0.001$) for the Ustipsamment can be used to predict the relative degradation of the oriented roughness by only knowing its initial value, for all rain magnitudes.

Most of simulated roughness (K' from 0 to 0.85) were able to reduce between 20 and 80% the relative erosion in comparison to the treatment without roughness (PR), in both soils.

The impact of the random roughness (C_{rr}) on the total soil surface roughness (K' value) was relatively low in both soils: C_{rr} controlled a maximum of 12% of the relative erosion in the Haplustoll and only 5% in the Ustipsamment, in agreement with the best aggregation of the Haplustoll than of the Ustipsamment. These results allow concluding that the oriented roughness has a high impact on wind erosion amounts in the studied soils. For this reason, the height of the ridges can be used as a simplified measure of K' in the wind erosion prediction models.

Efforts to control wind erosion in the studied region must be higher in the most critical periods of the year: spring, summer and winter. At these seasons the maintenance of a rough soil surface will be essential for controlling wind erosion, mainly in the Ustipsamment, which wind erosion susceptibility is high. The height of ridges that allow an efficient wind erosion control must be deeply analyzed in the future, as results of this study demonstrated that too high or too low ridges can produce the same or even more erosion than flat surfaces.

Índice Temático

Prefacio	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Summary	viii
Índice Temático	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xiv
Índice de Anexos	xvi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Erosión Eólica: Importancia del Proceso	2
1.2. Mecánica del Proceso Erosivo	5
1.3. Factores que Regulan la Erosión Eólica	10
1.3.1. Velocidad Umbral del Viento	11
1.3.2. Rugosidad de la Superficie del Suelo	15
1.3.2.1. Labranzas y Rugosidad Superficial	19
1.3.2.2. Degradación de la Rugosidad Superficial por la Lluvia	21
1.4. Modelos para la Predicción de la Erosión Eólica	24
1.5. Ecuación Revisada de la Erosión Eólica (RWEQ)	29
1.5.1. Principales Características	29
1.5.2. El Parámetro Rugosidad del Suelo en la RWEQ	31
1.5.3. Degradación de la Rugosidad del Suelo en la RWEQ	33
1.6. Fundamentos y Planteo de Hipótesis	34
1.6.1. Velocidad Umbral	34
1.6.2. Rugosidad de la Superficie del Suelo y Precipitaciones.	35

1.6.3. Rugosidad y Erosión Eólica.	38
1.7. Objetivos	39
Capítulo 2. Materiales y Métodos	41
2.1. Área de Estudio	42
2.2. Sitios Experimentales	44
2.3. Metodologías propuestas para validar la hipótesis 1	45
2.4. Metodologías propuestas para validar la hipótesis 2	52
2.5. Metodologías propuestas para validar la hipótesis 3	57
Capítulo 3. Resultados y Discusión	62
3.1. Resultados obtenidos para validar la hipótesis 1.	63
3.2. Resultados obtenidos para validar la hipótesis 2	71
3.3. Resultados obtenidos para validar la hipótesis 3	97
Capítulo 4. Conclusiones	119
5. Bibliografía	128
6. Anexo	147

Índice de Tablas

1. Parámetros de entrada de los modelos WEQ, EWEQ, RWEQ y WEPS.	27
2. Rugosidades producidas por tres sistemas de labranza.	52
3. Velocidad umbral del viento (u_t), velocidad media del viento (\bar{u}), velocidad media del viento en los periodos con actividad de saltación [$\bar{u}(u_t)$] y cantidad de material erosionado.	66
4. Rugosidad no orientada (C_{rr}) y orientada (K_r) inicial de dos suelos, producida por cada herramienta de labranza.	72
5. Tasa de degradación de la rugosidad orientada (ORRm) y no orientada (RRRm) de dos suelos, en tres labranzas y luego de dos tiempos de simulación de lluvia.	74
6. Valores de los coeficientes de las regresiones existentes entre el factor de rugosidad (K') y el material erosionado (g) a diferentes velocidades de viento, en los dos suelos.	101

Indice de Figuras

1. Representación esquemática de los procesos de transporte de partículas por el viento.	6
2. Representación esquemática de los parámetros del suelo y de los cultivos que reducen la fuerza erosiva del viento.	11
3. Ubicación del área de estudio: ♦ Sitio I y ◇ Sitio II.	43
4. Vista general de la parcela de referencia (PR).	45
5. Vista de la estación meteorológica portátil y sus componentes.	46
6. Vista general del SENSIT y sus componentes.	47
7. Vista de la distribución espacial e identificación de los colectores BSNE en la parcela de referencia (PR).	48
8. a) Ubicación de colectores BSNE en altura, b) detalle de circulación de aire, c) detalle de la abertura.	49
9. Vista general de la superficie del suelo luego de una simulación de lluvia: a) Arado de rastra (DT), b) Sembradora de grano fino (DH) y c) Sembradora lister (LB).	53
10. Vista del simulador de lluvia portátil	54
11. Medición de la rugosidad: a) no orientada sobre (1) la parcela de referencia (PR) y (2) la parcela con camellones, y b) Orientada.	56
12. Vista del ensayo de simulación de lluvia. R son las réplicas realizadas para cada tiempo de simulación y condición de rugosidad a evaluar, antes y después de cada simulación.	57
13. Componentes del túnel de viento portátil: a) hélice, b) motor con carcasa protectora, c) placa cribada, d) salida del túnel y colector entero, e) zona de medición, f) tramo del túnel con piso y g) chapas deflectoras.	59
14. Condiciones climáticas durante el período 2003-2005.	64
15. Velocidad media del viento (\bar{u}), velocidad umbral del viento (μ_t) y velocidad media del viento para el período con actividad de saltación [$\bar{u}(\mu_t)$] entre 2003 - 2005.	65
16. Degradación de la rugosidad orientada (ORRm) en a) el Haplustol b) el Ustipsamment, y de la rugosidad no orientada (RRRm) en c) el Haplustol y d) el Ustipsamment, producidas por tres herramientas de labranza en función de la cantidad de lluvia (CUMR).	80

17. Degradación de la rugosidad orientada (ORRm) en a) el Haplustol b) el Ustipsamment, y de la rugosidad no orientada (RRRm) en c) el Haplustol y d) el Ustipsamment, producidas por tres herramientas de labranza en función de la energía de lluvia (CUMEI).	83
18. Relación entre el cambio de la rugosidad orientada (ORR) calculado con las ecuaciones del modelo RWEQ y el ORR medido a campo en condiciones controladas, en forma: a) sin diferenciar por labranzas labranzas en el Haplustol, b) sin diferenciar por labranzas en el Ustipsamment, c) en forma individual por labranza en el Haplustol y d) en forma individual por labranza en el Ustipsamment.	87
19. Relación entre el cambio de la rugosidad no orientada (RRR) calculado con las ecuaciones del modelo RWEQ y el RRR medido a campo en condiciones controladas, en forma: a) sin diferenciar por labranzas labranzas en el Haplustol, b) sin diferenciar por labranzas en el Ustipsamment, c) en forma individual por labranza en el Haplustol y d) en forma individual por labranza en el Ustipsamment.	89
20. Tasa de degradación relativa de la rugosidad orientada (D) luego de una simulación de lluvia en función de su valor inicial en a) el Haplustol éntico y b) el Ustipsamment típico.	92
21. Tasa de degradación relativa de la rugosidad no orientada (D) luego de una simulación de lluvia en función de su valor inicial en a) el Haplustol éntico y b) el Ustipsamment típico.	94
22. Material erosionado en función del coeficiente de rugosidad (K') a diferentes velocidades de viento, en dos suelos. Los círculos y rombos en color verde corresponden a datos de material erosionado en la parcela de referencia (PR) para los tratamientos mencionados.	99
23. Variación de la tasa relativa de erosión de dos suelos en función del coeficiente de rugosidad (K') calculado a) en base a los valores de rugosidad orientada (Kr) y no orientada (Crr) y b) considerando solamente Kr (Crr=0).	104
24. Variación de la tasa relativa de erosión en función de la altura inicial del camellón en tres sistemas de labranzas y dos suelos.	110
25. Valores de Crr (Kr final/ Kr inicial) en función de la cantidad de material erosionado para tres labranzas en a) el Ustipsamment y b) el Haplustol.	114

Indice de Anexos

A-1. K' en función de la rugosidad no orientada (Crr) y rugosidad orientada Kr).	148
A-2. Ejemplo de la hoja de cálculo para estimar el transporte de masa en cada punto de muestreo.	149
A-3. Resultados de las simulaciones de lluvia para valuar la degradación de la rugosidad no orientada (RRR) de la rastra (T1), lister (T2) y sembradora (T3), en el Haplustol éntico.	150
A-4. Resultados de las simulaciones de lluvia para valuar la degradación de la rugosidad orientada (ORR) de la rastra (T1), lister (T2) y sembradora (T3), en el Haplustol éntico.	151
A-5. Resultados de las simulaciones de lluvia para valuar la degradación de la rugosidad no orientada (RRR) de la rastra (T1), lister (T2) y sembradora (T3), en el Ustipsamment típico.	152
A-6. Resultados de las simulaciones de lluvia para valuar la degradación de la rugosidad orientada (ORR) de la rastra (T1), lister (T2) y sembradora (T3), en el Ustipsamment típico.	153
A-7. Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Ustipsamment típico para rastra (T1).	154
A-8. Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Ustipsamment típico para lister (T2).	155
A-9. Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Ustipsamment típico para sembradora (T3).	156
A-10. Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Ustipsamment típico para la parcela de referencia (Testigo).	157
A-11. Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Haplustol éntico para rastra (T1).	158
A-12. Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Haplustol éntico para lister (T2).	159
A-13. Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Haplustol éntico para sembradora (T3).	160
A-14. Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Haplustol éntico para la parcela de referencia (Testigo).	161

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Erosión Eólica: Importancia del Proceso

La erosión eólica del suelo es un proceso geológico que condiciona la evolución natural del paisaje, pero en este último tiempo su magnitud se ha incrementado drásticamente debido a la acción antrópica (erosión acelerada) (Buschiazzo y Aimar, 2003). El equilibrio entre la erosión geológica y la acelerada se da cuando el suelo no sufre ningún deterioro progresivo, es decir, cuando la tasa de pérdida de suelo no es superior a su tasa de formación, de suelo que oscila en $12.5 \text{ t (ha.año)}^{-1}$ (Buschiazzo y Aimar, 2003).

Lal (1991) estimó que aproximadamente el 30% de la superficie del planeta se ve afectada por la erosión antrópica, la cual es 2.5 veces mayor que la natural o geológica. Se calcula que la erosión eólica se ha incrementado de 100 a 1000 veces en suelos agrícolas de zonas áridas y semiáridas del mundo, debido al aumento de la acción antrópica (Dregne, 1986).

La erosión eólica puede ser definida como el proceso mediante el cual se produce la remoción, selección y transporte del material superficial del suelo por la acción del viento (Chepil, 1945), siendo considerada uno de los procesos de degradación de suelo más importantes de regiones áridas y semiáridas del mundo. La gravedad de este proceso en estas áreas se debe principalmente a la presencia de suelos secos, sueltos y arenosos, grandes extensiones de planicies con poca a nula cobertura vegetal y fuertes vientos (FAO, 1979).

Benites *et al.* (1994) estimaron que el 8 % de las tierras áridas y semiáridas de Argentina sufren erosión eólica. Buschiazzo *et al.* (2007), sin embargo, mencionan que un 75% de la superficie Argentina sería muy vulnerable a la erosión acelerada.

Covas y Glave (1996) demostraron que en las planicies semiáridas de la

Pampa Central, 565.000 ha son afectadas por erosión eólica, de las cuales unas 220.000 ha presentan riegos bajos de erosión eólica, 160.000 ha moderados, 75.000 severos y 110.000 ha graves.

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 polvo en suspensión, 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 partículas finas transportadas por suspensión, denominadas material particulado (Particulate Matter, PM₁₀), son aquellas con diámetros menores a 10 µm. Estas no sólo generan polución ambiental, sino también incrementan la intransitabilidad de caminos y pueden desencadenar enfermedades respiratorias, provocando daños irreversibles y grandes pérdidas económicas. Huszar y Piper (1986) estimaron que la presencia de polvo atmosférico produce, en Nueva México, pérdidas de 466 millones de dólares por año.

Recientes estudios han demostrado que las fuentes antropogénicas, que incluyen principalmente tierras utilizadas para agricultura y ganadería, aportan la mayor cantidad de polvo en suspensión respecto del total de polvo

suspendido en la atmósfera (Tegen y Fung, 1995; Sokolik y Toon, 1996; Ginoux *et al.*, 2001). Korcz *et al.* (2009) encontraron, para áreas naturales de Europa, un factor de emisión de PM10 de 0.021 Mg km⁻², mientras que para áreas agrícolas y áreas antropogénicas los valores fueron 0.157 y 0.118 Mg km⁻², respectivamente.

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 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) comprobaron que en suelos de la región semiárida pampeana de Argentina el viento produce un transporte diferencial de las partículas del suelo y que la relación entre minerales livianos y pesados fue mayor en los pedones menos erosionados. Estos mismos autores concluyeron que los suelos de esta región se vuelven más arenosos, 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 alta concentración de N y P en el material erosionado determinan que las pérdidas de nutrientes provocadas por la labranza convencional y vertical representen un 3 % del P total y un 0.03 % del N total, acentuado la importancia de la pérdida de P por el proceso de erosión eólica (Buschiazzo, 2006).

La alta presión de pastoreo, la degradación de la estructura y la falta de adecuadas prácticas conservacionistas conducen a los suelos de regiones

áridas y semiáridas a incrementar su susceptibilidad a erosionarse por viento, lo que tiene efectos sobre procesos como la desertificación y el cambio climático (Nicholson, 2000).

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. Buschiazzo y Aimar (2003) y Panebianco y Buschiazzo (2008) comprobaron que la erosión de Ustipsamments típicos y Haplustoles énticos de la RSPC, superaban las tasas permisibles para suelos de estas texturas (arenosa franca y franco arenosa), que se encuentra en aproximadamente $8 \text{ t (ha.año)}^{-1}$.

1.2. Mecánica del Proceso Erosivo

En esta sección se hablará de partícula en forma genérica, asumiendo que este término involucra también los agregados del suelo. La Figura 1 muestra los diferentes procesos simultáneos de transporte de partículas que ocurren durante la erosión eólica (Papendick, 1998). Cada una de estas formas de transporte funcionan de manera diferente, dependiendo del tamaño de las partículas y de las características del viento cerca de la superficie (Saxton *et al.*, 2001). La forma, el tamaño y la densidad de las partículas influyen en la erodabilidad del suelo, y definen, juntas, el diámetro equivalente de una partícula. 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 es la que define la pendiente de la curva de distribución de la velocidad del viento con la altura (Chepil, 1958).

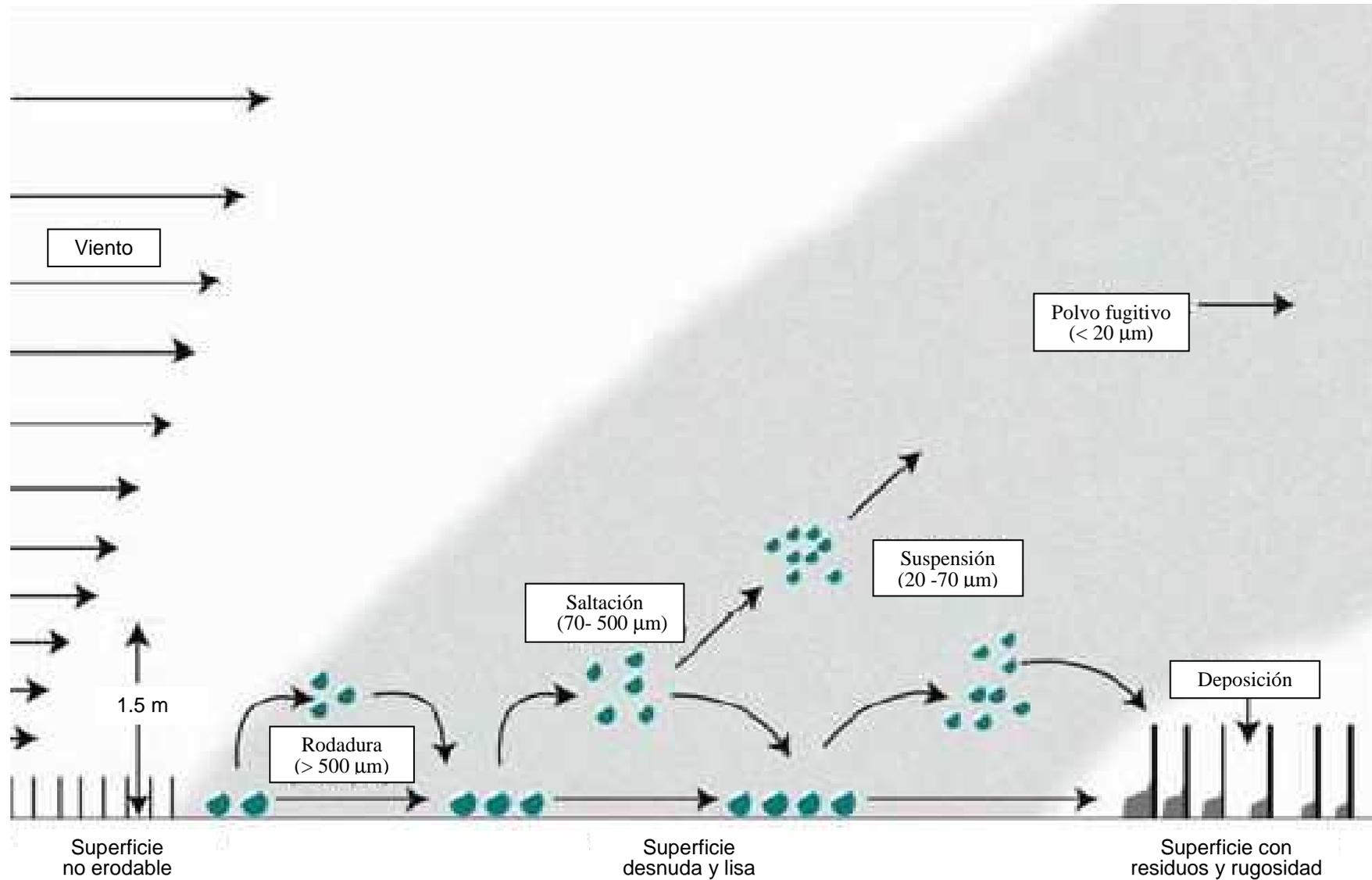


Figura 1. Representación esquemática de los procesos de transporte de partículas por el viento.

La erosión eólica del suelo involucra la movilización, abrasión, transporte y deposición de partículas.

Según Chepil (1961), 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). Iversen *et al.* (1976) mejoró el modelo anterior y comprobó 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.

La movilización de las partículas se produce solamente cuando las fuerzas aerodinámicas (desestabilizadoras) superan la magnitud de las fuerzas estáticas, que mantienen a las partículas agrupadas y adheridas a la superficie del suelo. Una vez comenzado el proceso de erosión, las partículas que permanecen en el suelo pueden ser movilizadas por la colisión de las que se encuentran en movimiento. El proceso de erosión eólica comienza cuando la velocidad del viento supera la velocidad umbral, que es la velocidad mínima necesaria para iniciar el proceso de erosión eólica.

La susceptibilidad de un material a la abrasión puede definirse como la masa de ese 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 cobra mayor magnitud en los ambientes sedimentarios, donde el viento es capaz de corroer la base de estos sedimentos dando lugar a una gran variedad de formas, tal es el caso del Valle de la Luna, San Juan, Argentina (Buschiazzo y Aimar, 2003). La abrasión también afecta la distribución de tamaño de los agregados y su acomodamiento espacial dentro del sistema suelo (Buschiazzo y Aimar, 2003).

Una vez puestas en movimiento por el viento, las partículas son transportadas y sedimentadas a menor o mayor distancia, dependiendo de su tamaño (Buschiazzo y Aimar, 2003). De acuerdo a su diámetro, las partículas pueden ser transportadas por saltación, suspensión, o rodadura (Fig. 1).

Saltación es la forma de transporte de partículas más importante en el proceso de erosión. Por este proceso se transporta entre un 50 y un 80 % del total de material transportado por el viento (Lyles, 1988). La saltación 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 por el flujo de aire, las partículas impactan en la superficie del suelo pudiendo disgregarse, desintegrar otras partículas presentes en la superficie del suelo o rebotar y reiniciar el movimiento nuevamente (Lyles, 1988). Las partículas que se transportan por saltación poseen un diámetro que oscila entre los 100-500 μm . Comúnmente, 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) reportó que el ángulo de despegue de estas partículas oscila entre 75-90° e impactan sobre la superficie del suelo con un ángulo de 6° a 12°. Este mismo autor ha demostrado que existe en el flujo de saltación una apreciable rotación de las partículas que oscila 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).

Suspensión se refiere al transporte vertical, y eventualmente horizontal, de partículas muy pequeñas del suelo que son generalmente alejadas de su fuente de origen (Lyles, 1988). Estas partículas 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). Sin embargo, en el transporte a grandes distancias, las partículas < 20 μm son las que más predominan ya que las de mayor tamaño poseen mayor velocidad de sedimentación (Gillette, 1977). Si bien partículas < 20 μm 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.

Rodadura es el transporte que se realiza sin un despegue de las partículas de la superficie del suelo. Las partículas involucradas en este tipo de movimiento poseen un diámetro mayor a 500 μm (Chepil, 1945). La rodadura, en condiciones de vientos fuertes, produce un efecto que aparenta ser un

movimiento de avance general de la superficie del suelo, en la dirección predominante de viento. El transporte por rodadura constituye entre el 7-25 % del total del transporte producido por erosión eólica (Bagnold, 1941; Chepil, 1945). 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).

1.3. Factores que Regulan la Erosión Eólica

El proceso de erosión eólica se inicia cuando la velocidad del viento excede la velocidad umbral requerida para iniciar el movimiento de las partículas. La velocidad umbral puede modificarse en función de algunas variables como las características de la superficie del suelo, por ejemplo contenidos de humedad y la rugosidad del terreno, o por la presencia de materiales que cubran la superficie del suelo, como residuos o canopia de cultivos (Saleh y Fryrear, 1997, citado por Fryrear *et al.*, 1998). Todos estos parámetros ofrecen una resistencia a la fuerza del viento. Recién cuando esta fuerza de resistencia es superada se inicia el proceso de erosión eólica (Fig. 2).

Todos estos factores son contemplados en los mecanismos de control de la erosión eólica, que se basan en dos conceptos fundamentales: el incremento de la altura de la capa límite y la disminución de la distancia recorrida por las partículas.

La capa límite es la región próxima a la superficie del suelo, en la cual el movimiento del viento es laminar y su velocidad, y por ende su energía de transporte es nula (Geiger, 1957). Por otra parte, la cantidad de material

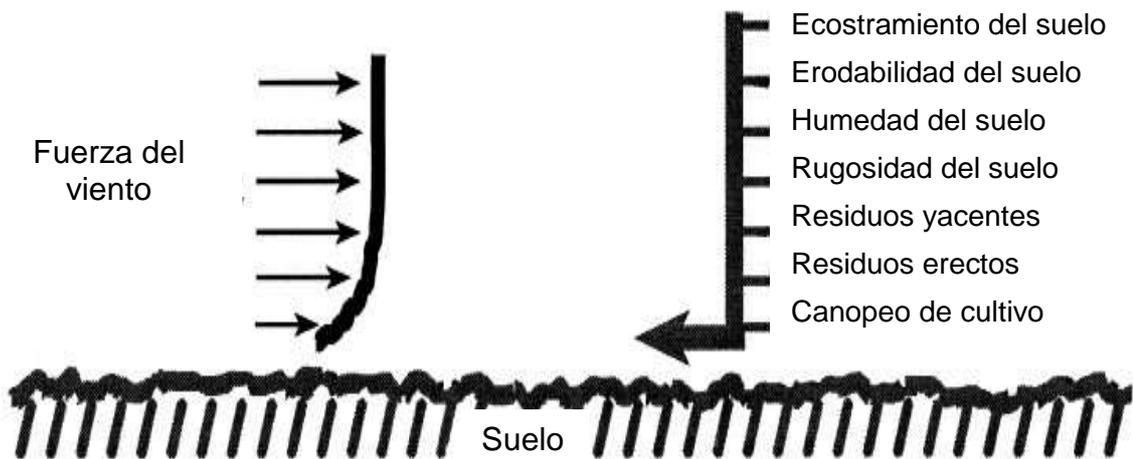


Figura 2. Representación esquemática de los parámetros del suelo y de los cultivos que reducen la fuerza erosiva del viento (extraído de Fryrear *et al.*, 1998).

transportado en la masa de aire aumenta exponencialmente con la distancia, en la dirección predominante del viento. Por ende al aumentar la distancia recorrida por el viento sin obstáculos, aumenta la cantidad de material erosionado, hasta alcanzar un máximo a una distancia definida. Esta distancia depende de la velocidad del viento y de las características del terreno (Chepil y Milne, 1941).

Los factores que tienen mayor incidencia sobre la magnitud de la erosión, y por lo tanto son esenciales para el control de la erosión en suelos agrícolas, son la rugosidad superficial y la cobertura vegetal (Fryrear, 1984 y Sterk y Spaan, 1997). En regiones semiáridas, en las cuales la producción de residuos vegetales es limitada, la rugosidad creada por las operaciones de labranza puede jugar un rol fundamental para controlar de la erosión eólica (Saleh, 1997), ya que puede aumentar la cantidad de agregados no erosionables sobre la superficie o incrementar la velocidad umbral del viento (Chepil y Woodruff, 1963).

1.3.1. Velocidad Umbral del Viento

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). Esta es variable y depende de diversos factores relacionados, principalmente, con las condiciones de la superficie del suelo (textura, humedad, cobertura vegetal y rugosidad) y del clima (precipitación, temperatura y humedad relativa) (Stout 2003, 2004).

Para otros autores, las condiciones de la superficie del suelo más importantes que regulan μt son el tamaño y la densidad de las partículas (Greeley e Iversen, 1985; Cornelis *et al.*, 2004) y la humedad del suelo (Ravi *et al.*, 2004, 2006; Cornelis y Gabriels, 2003; Cornelis *et al.*, 2004). El contenido de humedad del suelo contribuye fuertemente a aumentar μt al incrementar la adhesión de las partículas entre sí (McKenna-Neuman y Nickling, 1989).

Varios autores han considerado el efecto de la humedad del suelo sobre la velocidad umbral del viento desarrollando ecuaciones empíricas (McKenna-Neuman y Nickling, 1989; Gregory y Darwish, 1990; Fecan *et al.*, 1999) y han encontrado importantes relaciones con variables climáticas tales como la humedad del aire, la precipitación y la temperatura. Estos estudios no han sido aun desarrollados para suelos de Argentina.

Gregory y Darwish (1990) comprobaron, a través de ensayos con túnel de viento, una gran dependencia entre la velocidad umbral y la humedad del aire, sugiriendo que la condición de humedad de la superficie del suelo tiende a alcanzar un equilibrio con la atmósfera cercana a la superficie del suelo. Estudios más recientes (Ravi *et al.*, 2004, 2006; Ravi y D’Odorico, 2005) han demostrado que el contenido de humedad de la superficie del suelo y la velocidad umbral del viento pueden ser significativamente afectadas por

cambios en la humedad atmosférica, con un importante efecto sobre la erosión potencial. Bajo estas circunstancias, la humedad del aire podría ser utilizada como un buen predictor de la erosionabilidad de un suelo (Ravi *et al.*, 2004).

Ravi *et al.* (2004 y 2006) demostraron que μ_t disminuye con el incremento de la humedad del aire para valores de humedad relativa entre 35 y 60 %, mientras que por encima y por debajo de este rango, aumenta. Estos resultados se explican por efecto de fuerzas higroscópicas y su dependencia del potencial mátrico en el caso de suelos secos. En suelos húmedos, la velocidad umbral aumenta a medida que la humedad del suelo aumenta debido a la prevaencia de fuerzas capilares (Ravi y D'Odorico, 2005).

Saleh y Fryrear (1995) observaron que existe un contenido de agua crítico, cercano a un potencial mátrico de 1.5 MPa, por encima del cual no ocurre erosión eólica. Cornelis *et al.* (2004) desarrollaron un modelo conceptual para predecir la velocidad umbral en base al contenido de agua de los primeros cm del suelo. Para ello, relacionaron la velocidad umbral con el cociente entre el contenido de agua y el de agua retenida a un potencial mátrico de 1.5 MPa. Estos autores también concluyeron que el viento debería secar la superficie del suelo por debajo de la condición de humedad existente a los 1.5 MPa antes de que la erosión eólica pueda ocurrir y que una vez alcanzada esta condición de humedad la velocidad umbral disminuiría drásticamente.

Muchos autores concuerdan en que existe un contenido de agua crítico por encima del cual no ocurre erosión por el viento, pero este contenido varía de acuerdo al tipo de suelo, principalmente con su textura (Bisal y Hsieh, 1966; Azizov, 1977; Hagen *et al.*, 1988; Chen, 1991; Chen *et al.*, 1996).

Autores como Greeley e Iversen (1985) y Chepil (1958) han

comprobado que existe una relación directa entre el diámetro de la partícula y la velocidad umbral: las que se movilizan con menores velocidades poseen diámetros de 0.1 a 0.15 mm (Hudson, 1981; Chepil y Woodruff, 1963). Las partículas que poseen mayores o menores diámetros que los mencionados requieren de mayores velocidades umbrales para su movilización (Yongliang Tian, 1988). La alta resistencia de las partículas finas a ser movidas por el viento obedece a la formación de agregados de mayor tamaño o a que por su tamaño muy pequeño no son alcanzadas por el flujo turbulento del aire que se produce por encima de la capa límite (Yongliang Tian, 1988).

En los suelos cultivados, la fracción de suelo no erosionable ofrece cierto grado de protección a la erosionable. Por esta razón, la velocidad umbral requerida para mover partículas erosionables es mayor si éstas están mezcladas con fracciones no erosionables (Chepil, 1958).

La mayoría de los estudios realizados en el pasado para establecer el valor de μ_t se han realizado con túneles de viento fijos (Bagnold, 1941; Zingg, 1953; Gregory y Darwish, 1990; Iversen y Rasmussen, 1994; Ravi *et al.*, 2004, 2006, Ravi y D'Odorico, 2005). El túnel de viento provee un ambiente controlado que permite un estudio cuidadoso y sistemático de la velocidad umbral (Stout y Zobeck, 1996; Stout, 2004), pero que no refleja exactamente las condiciones de campo. Por otro lado, la determinación de μ_t en condiciones de campo es dificultosa debido a la intermitencia del proceso de erosión eólica (Stout, 2004). La aparición del túnel de viento portátil permite solucionar este problema, debido a que es posible controlar características del viento tales como intensidad y dirección, pero bajo condiciones naturales de la superficie de suelo, lo que torna al valor de μ_t más aproximado al real.

Sumado a este avance, la utilización de sistemas que permiten determinar a campo y con gran precisión, el momento durante el cual existe movimiento de partículas ha facilitado el cálculo de μt en condiciones naturales. Gillete y Stockton (1986) desarrollaron el *SENSIT* (Fig. 6), un dispositivo electrónico que posee un diodo sensible al impacto de partículas y que ha sido utilizado por Stout y Zobeck (1996, 1997) y Stout (1998, 2003, 2004) para desarrollar un método de cálculo de μt considerando principalmente la velocidad media del viento y la actividad de saltación (Stout, 2004). Los pulsos registrados son almacenados en un datalogger. El *SENSIT* responde al impacto de partículas con un diámetro mayor a 200 μm , que se mueven principalmente por saltación (Stout y Zobeck, 1996). La actividad de saltación (γ) se define como la fracción de tiempo dentro de un periodo determinado de medición donde las partículas que se mueven por saltación son detectadas (Stout y Zobeck, 1997). El valor de γ pueden variar entre 0 y 1, indicando $\gamma=0$ una condición de inactividad y $\gamma=1$ una condición de actividad continua. Altas frecuencias de muestreo de la velocidad de viento y γ son críticas para asegurar un valor más real de la velocidad umbral de una superficie erodable.

1.3.2. Rugosidad de la Superficie del Suelo

La rugosidad superficial que camellones y agregados producen sobre la superficie del suelo, disminuye la velocidad del viento cerca de la superficie del mismo. En otras palabras, la rugosidad superficial aumenta la longitud de la rugosidad aerodinámica (Z_0) (Chepil, 1958) y lo protege de la erosión. Esto hace que la emisión y deposición de partículas se vea afectada, teniendo un efecto final importante sobre la erosión eólica (Armbrust *et al.*, 1964).

La rugosidad también se asocia con otras propiedades del suelo como el tamaño de agregados (Colvin *et al.*, 1984), propiedades térmicas del suelo y el balance de energía (Allmaras *et al.*, 1977; Cruse *et al.*, 1980, Eltz y Norton, 1997), la reflexión de la radiación solar (Cruse *et al.*, 1980; Cogo *et al.*, 1983), la evaporación, la infiltración, el intercambio gaseoso del suelo (Allmaras *et al.*, 1977, Eltz y Norton, 1997) y la erosión (Jonson *et al.*, 1979; Cogo, 1981; Cogo *et al.*, 1983).

La rugosidad de la superficie del suelo es uno de los parámetros edáficos más eficientes para controlar la erosión eólica e hídrica (García Moreno *et al.*, 2008). En las regiones semiáridas, donde la cobertura vegetal suele ser limitada, la rugosidad de la superficie del suelo, particularmente aquella creada por los implementos de labranza, es el principal parámetro utilizable para controlar la erosión eólica (Saleh y Fryrear, 1998).

El efecto de la superficie rugosa sobre la erosión depende del tamaño, la forma y la frecuencia lateral de los agregados y camellones presentes en la superficie del suelo (Chepil y Woodruff, 1954).

La rugosidad de la superficie del suelo se clasifica en orientada y no orientada (Fryrear, 1984). Ambas afectan la emisión y/o la deposición de partículas en el terreno (Hagen, 1988; Stout y Zobeck, 1996) y disminuyen la velocidad promedio del viento en la superficie del suelo, reduciendo la erosión eólica (Arika *et al.*, 1986; Fryrear, 1984).

La rugosidad no orientada (C_{rr}) se produce por la distribución aleatoria de los agregados del suelo. Muchos autores la expresan como el índice RR, que es calculado mediante la desviación estándar de los puntos de elevación individuales luego de que la rugosidad orientada y la pendiente del terreno se

han eliminado (Allmaras *et al.*, 1966; Currence y Lovely, 1970). Este índice asume una rugosidad no orientada o natural vertical sin correlación espacial. Otros autores formulan índices de rugosidad geo-estadísticos y estadísticos que incluyen una componente espacial, pero éstos aún están en desarrollo (Kamphorst *et al.*, 2000; Vidal Vázquez *et al.*, 2005).

La rugosidad orientada (K_r) es la producida por las herramientas de labranza que definen un patrón particular y dirección específica de los camellones (Zobeck, 1991) que se expresa en términos de alturas de los camellones y espaciamiento entre los mismos (Chepil y Milne, 1941).

Las técnicas de medición más utilizadas pueden ser clasificadas por la dimensión de la medición y por el tipo de descripción y lectura de la superficie (Jester y Klik, 2005). La primera incluye medición del perfil en dos dimensiones (2D) y en tres dimensiones (3D). Las 2D permiten una rápida adquisición de datos y son muy usadas para investigaciones de campo aunque carecen de un significado físico, en tanto que las 3D dan una representación más real de la superficie y permiten el cálculo de parámetros físicos de la superficie (Jester y Klik, 2005). De acuerdo al modo de descripción de la superficie del suelo, las técnicas se pueden clasificar en “de contacto” y “de no contacto”. El perfilómetro de agujas (Kuipers, 1957, Potter *et al.*, 1990) y el método de la cadena (Saleh, 1993; Merrill, 1998) son algunas de las técnicas de contacto; el método fotogramétrico (Welch *et al.*, 1984, Warner, 1995; Wegmann *et al.*, 2001), el método infrarrojo (Römkens y Wang, 1986), el método ultrasónico (Robichaud y Molnau, 1990), las técnicas láser (Helming *et al.*, 1998; Darboux y Huang, 2003) y los radares satelitales (Courault *et al.*, 1993, Moran *et al.*, 1997; Sano *et al.*, 1998), se cuentan entre las técnicas de no contacto.

La mayor desventaja de los dispositivos de medición de altura con contacto es la deformación del perfil o contorno original de la superficie del suelo, especialmente sobre los granos simples o suelos húmedos y también el límite de la resolución (vertical 1-2 mm y horizontal usualmente 20-25 mm). Por otro lado, los dispositivos basados en sistemas láser tienen una resolución en el rango de longitud característica de los procesos de erosión e incluso aún menor (vertical 0.1- 0.5 mm y horizontal 0.1- 2 mm). El método estéreo-fotográfico se conoce por su rápida adquisición pero consume tiempo y requiere procedimientos de computación por lo que han sido usados mucho menos a pesar de su aceptable resolución (vertical >0.2 mm y horizontal >2 mm). El radar satelital es una técnica que aún esta en fase experimental pero puede evaluar la rugosidad del suelo sobre una mayor área superficial (Jester y Klik, 2005).

Algunos trabajos han demostrado que camellones de 5 a 10 cm de altura, perpendiculares a la dirección del viento, reducen el movimiento de partículas en un 90%; siempre y cuando no se trate de un suelo de textura gruesa o grano simple (Fryrear, 1990). Otras observaciones de campo indican que suelos arenosos, con camellones de 25 cm de altura, no son erosionables (Fryrear 1984). Resultados de Chepil y Milne (1941) indican que camellones de 2.5 pulgadas de altura, perpendiculares a la dirección del viento, reducen la tasa de erosión eólica desde $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{3}$ de la que ocurre en una superficie lisa. Estos mismos autores también encontraron que en suelos cultivados, los agregados protegen los camellones y los mantienen cerca de su altura original. Armbrust *et al.* (1964) evaluaron el efecto de la altura de los camellones sobre la erosión eólica bajo condiciones de laboratorio con túneles de viento y

encontraron que aquellos de 5.1 a 10.2 cm de altura se erosionan poco debido al entrapamiento de las partículas del suelo entre los camellones ya que la velocidad de viento promedio disminuye. Camellones con una altura inferior a 5.1 cm no fueron efectivos para entrapar partículas y reducir la velocidad del viento, al igual que los camellones con una altura superior a los 10.2 cm donde la erosión aumentaba como resultado de altas velocidades y la elevada turbulencia del viento en la cresta de los camellones.

Otros autores también han cuantificado el efecto protector que tienen los camellones perpendiculares a la dirección predominante del viento (Zobeck y Popham, 2001; Hagen y Armbrust, 1992). La capacidad de los camellones para controlar la erosión eólica no sólo depende de su altura sino también del grado de agregación del suelo y de la velocidad de arrastre del viento (Armbrust *et al.*, 1964).

Las lluvias y los sistemas de labranza son los factores que mayor efecto poseen sobre la rugosidad superficial del suelo. En general, las lluvias disminuyen la rugosidad de la superficie y las herramientas de labranza determinan el tamaño de los agregados del suelo (Fryrear, 1984; Zhang *et al.*, 2004). Las labranzas pueden aumentar o disminuir la rugosidad de la superficie, dependiendo del tipo de herramientas y de las condiciones del suelo al momento de realizar las labranzas (Zobeck y Onstad, 1987) tales como contenido de humedad del suelo, textura, cantidad de residuos e historia previa del lote, entre otras (Allmaras *et al.*, 1967; Ojeniyi y Dexter, 1979; Zobeck y Onstad, 1987).

1.3.2.1. Labranzas y Rugosidad Superficial

Muchos investigadores han medido el efecto de la rugosidad creada por una variedad de sistemas de labranzas (Mannering *et al.*, 1966; Dexter, 1977; Onstad, 1984; Steichen, 1984, Eltz y Norton, 1997). Varios autores (Laften *et al.*, 1978; Lyles y Tatarko, 1982; Cogo *et al.*, 1983; Lal y Van Doren, 1990) han considerado al arado de cincel como una de las herramientas que causan una considerable rugosidad en el suelo mejorando su infiltración y disminuyendo la escorrentía y la erosión del suelo.

Para que un implemento de labranza sea efectivo en la creación de una superficie rugosa deben existir condiciones de suelo propicias para la producción de agregados no erosionables al momento de realizar las labranzas (Lyles y Tatarko, 1982). Las condiciones del suelo óptimas pueden variar de acuerdo a un número de factores como humedad del suelo al momento de realizar las operaciones, velocidad y profundidad de las labranzas, cantidad de residuos presentes en el suelo, historia previa de cultivo y principalmente la textura del suelo (Allmaras *et al.*, 1967; Ojeniyi y Dexter, 1979; Fryrear, 1984).

Las herramientas de labranza no sólo determinan el tamaño de los agregados del suelo (Zhang *et al.*, 2004) sino también un patrón particular (altura y espaciamiento) de los camellones en una dirección específica (Zobeck, 1991). El efecto de las labranzas sobre las propiedades temporales del suelo es analizado en los modelos de erosión eólica (RWEQ y WEPS) dentro del submodelo suelo y/o labranza.

Zobeck y Popham (1997) demostraron que la tasa de incremento de la fracción de suelo susceptible a la abrasión (FSA) es muy sensible a las labranzas, principalmente a la dirección de las mismas y a los sistemas de cultivo. Una menor FSA implica mayor rugosidad superficial y por ende mejor

protección contra la erosión (Zobeck y Popham, 2001). Los camellones creados por las herramientas de labranza aportan un 20% más de protección frente a la abrasión de la superficie del suelo en dirección perpendicular que en dirección paralela a la orientación del viento (Zobeck y Popham, 2001).

1.3.2.2. Degradación de la Rugosidad Superficial por la Lluvia

Las lluvias, a través de su intensidad y magnitud se encuentran entre los factores más importantes de degradación de la rugosidad no orientada y orientada del suelo. Muchos investigadores han estudiado el efecto de la cantidad y energía de las lluvias sobre, principalmente, la rugosidad no orientada, en una amplia variedad de suelos y sistemas de labranzas (Zobeck y Onstad, 1987). El decaimiento de la altura de los camellones por efecto de las lluvias ha sido menos estudiado.

La mayoría de los estudios de degradación de la rugosidad superficial del suelo se han realizado con simuladores de lluvia, mediante los cuales es posible controlar la energía y cantidad de lluvia aplicada. Esto ha permitido elaborar numerosos modelos matemáticos, diferentes según la textura de los suelos, los sistemas de labranza y las características de las lluvias. Sin embargo, el comportamiento de la rugosidad de la superficie del suelo en condiciones naturales ha sido muy poco estudiado, principalmente debido a la poca disponibilidad de equipamientos seguros y portátiles para recolectar datos de campo luego de un evento de lluvia (Eltz y Norton, 1997).

Onstad *et al.* (1984) y Römkens y Wang (1985) describieron la degradación de los agregados del suelo en función de las lluvias acumuladas. Según Onstad *et al.* (1984) la lluvia generalmente disminuye los agregados del

suelo (RR) debido a la disrupción por el impacto de las gotas de lluvia. La disminución de RR por efecto de la lluvia fue descrita por el siguiente modelo $RR = a + b (TW / 1+TW)$ siendo RR la rugosidad no orientada en cm, a el valor inicial de RR, b un coeficiente de regresión y TW la lluvia acumulada aplicada en cm.

Potter *et al.* (1990) desarrolló una función exponencial para predecir la degradación de los agregados en función de las lluvias acumuladas. Este autor relacionó diferentes coeficientes en función del contenido de arcilla y de carbono orgánico (CO), concluyendo que la estabilidad de los agregados del suelo se incrementa con el porcentaje de arcilla y de CO hasta que estos alcanzan valores de 31% y 2.7 % respectivamente, para luego disminuir con contenidos superiores de ambos.

Otros autores remplazaron la cantidad de lluvia por una variable más sensible: la energía de la lluvia. Burwell y Larson (1969), Dexter (1977), Johnson *et al.* (1979) y Steichen (1984) encontraron una fuerte relación entre energía cinética de la lluvia y degradación de los agregados del suelo.

Burwell y Larson (1969) evaluaron cambios en la rugosidad no orientada del suelo en función de la energía cinética de la lluvia simulada, utilizando una ecuación exponencial de la forma $Y = a^{-bX}$ donde Y es la proporción de RR es decir el cociente entre el RR final y el RR inicial (RRR), X es la energía cinética en $Mj ha^{-1}$, y a y b son constantes. Cuando $X=0$, $Y = a$ y así " a " es el valor de RRR inicial. Estos autores comprobaron que RRR disminuye con el incremento de la energía de las lluvias, resultados que concuerdan con los obtenidos por otros autores como Dexter (1977), Johnson *et al.* (1979) y Steichen (1984), quienes analizaron energías de lluvias naturales.

Steichen (1984) también evaluó el efecto de la energía de la lluvia sobre RR en 4 sistemas de labranzas para un suelo específico. Lo novedoso de este estudio fue que el valor de "b" de la ecuación descrita en el párrafo anterior fue diferente para cada sistema de labranza. Según Zobeck y Onstad (1987) las diferencias en el valor de *b* entre los diferentes estudios realizados puede deberse a la diversidad de suelos estudiados, ya que, de acuerdo al tipo de suelo, varía la estructura, la agregación y la estabilidad de sus agregados.

La tasa de degradación de la rugosidad que producen lluvias de igual energía depende de la rugosidad inicial de la superficie del suelo y, en general, se incrementa con aumentos de la rugosidad inicial (Zobeck y Popham, 2001).

La mayoría de los estudios desarrollados coinciden en que la ecuación utilizada para predecir la degradación de la rugosidad orientada debe considerar la cantidad de lluvia como variable independiente, acompañada, en algunos casos, de otras variables, relacionadas, principalmente, con propiedades del suelo como contenido de MO, proporción de arena y de limo y/o tipos de labranzas.

Lyles y Tatarko (1987) describieron la degradación de la rugosidad orientada creada por una sembradora de grano fino, a través de la disminución de la altura de los camellones, utilizando dos o tres variables en sus ecuaciones de regresión. La precipitación acumulada fue el principal factor que afectó los cambios de altura de los camellones, seguido por propiedades del suelo como contenidos de MO, de arena, de limo y de Ca^{2+} intercambiable. Los autores asumen en dichas regresiones que el efecto de la precipitación acumulada sobre la persistencia de los camellones depende de la altura inicial de los mismos. Zobeck y Popham (1997) también señalan la importancia de la

textura del suelo para evaluar la degradación de los camellones y los agregados del suelo, luego de un evento de lluvia.

En general, los mejores modelos para predecir el efecto de las lluvias sobre la degradación de la rugosidad no orientada y orientada del suelo son aquellos que tienen en sus ecuaciones a la cantidad de lluvia como variable independiente, debido a que es una variable fácil de medir en comparación con la energía de la lluvia (Zobeck y Onstad, 1987; Lyles y Tatarko, 1987).

La tasa de degradación de los camellones es mucho más lenta que la de los agregados del suelo, además, los camellones son más efectivos para controlar la erosión durante períodos prolongados cuando la dirección del viento es perpendicular a los mismos. Los agregados naturales tienen la ventaja de proteger la superficie del suelo con la misma eficiencia en condiciones variables de direcciones de viento (Saleh y Fryrear, 1998).

1.4. Modelos para la Predicción de la Erosión Eólica

Numerosos estudios de laboratorio y de campo han sido desarrollados a partir de la década de 1930 para identificar los factores que controlan o aceleran el proceso de erosión eólica. Un estudio simultáneo de todos los factores que afectan la erosión eólica es muy difícil, por lo que el enfoque tradicional ha sido analizar un factor por vez (Fryrear *et al.*, 2001). Si bien se reconoce que muchos factores están relacionados entre sí, los supuestos sobre cómo éstos regulan al proceso de erosión eólica deben efectuarse teniendo en cuenta cómo cada factor afecta de forma independiente la erosión eólica. Para ello se han desarrollado modelos que permiten evaluar y seleccionar estrategias para controlar el proceso erosivo (Visser *et al.*, 2005). Para que los

modelos cumplan satisfactoriamente esta función es necesario contrastar los resultados con mediciones de campo.

El primer modelo desarrollado para predecir la erosión eólica a nivel de lote fue la Ecuación de Erosión Eólica Universal (USDA, 1961) que fue actualizado y publicado poco después como Ecuación de Erosión Eólica (WEQ) (Woodruff y Siddoway, 1965). La WEQ fue el único modelo disponible para controlar la erosión eólica 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).

La WEQ funciona en base a un factor denominado erodabilidad del suelo (I) el cual se define como la erosión eólica potencial, expresada en toneladas por hectárea por año de un suelo desnudo, sin rugosidad ni encostramiento superficial (Fryrear *et al.*, 2001). Recientemente, una versión de la WEQ ha sido desarrollada en soporte electrónico y calibrada para la región central de Argentina por Panebianco y Buschiazzo (2008). Esta versión ha recibido el nombre de EWEQ (Wind Erosion Equation en Español).

La RWEQ posee como factor desencadenante al viento; independientemente del tipo de suelo ninguna superficie se puede erosionar más de lo que la capacidad de transporte máxima del viento permite (Fryrear *et al.*, 2001). La RWEQ estima el transporte de masa expresado como la masa de suelo transportada por el viento en una banda de ancho unitario que se extiende desde la superficie hasta los 2 metros de altura (Fryrear *et al.*, 1999) y a partir de este concepto calcula la erosión del suelo promedio para una superficie entera. Contrariamente, la WEQ calcula la erosión promedio para

varias longitudes de superficie y para una altura ilimitada de transporte (Woodruff y Siddoway, 1965).

Todos estos modelos poseen subrutinas de clima, suelo y cobertura con vegetación. Los principales parámetros de estos cuatro modelos son mostrados en la Tabla 1.

La WEQ y la EWEQ permiten estimar la erosión eólica de suelos sometidos a sistemas de rotación predefinidos, para períodos de 1 año. La ecuación general de estos modelos es la siguiente:

$$E = f(I, K, C, L, V) \quad \text{Ec. [1]}$$

donde E es la erosión anual ($t \text{ (ha año)}^{-1}$), I es el índice de erodabilidad del suelo determinado por la cantidad de agregados mayores a 0.84 mm de diámetro, K es el factor de rugosidad orientada, C es el factor climático local, L la longitud del terreno no protegido y V la cobertura vegetal medida en $kg \text{ ha}^{-1}$ (Tabla 1). La WEQ permite determinar la cantidad de cobertura necesaria para lograr una pérdida tolerable de suelo, establecer un ancho de faja adecuado para el control de la erosión o comparar la eficiencia de manejos alternativos para controlar el proceso (Buschiazzo y Aimar, 2003). Este modelo, si bien ha sido muy difundido presenta algunas limitantes, como su carácter empírico y la consideración de valores únicos para variables del suelo y de cobertura muy dinámicas como son la degradación de la rugosidad y la descomposición de residuos vegetales (Fryrear *et al.*, 1998), además de no tener en cuenta la formación de costras superficiales (Buschiazzo y Aimar, 2003). Sin embargo, aún cuando sea próximamente reemplazada por la WEPS, la WEQ es el modelo utilizado actualmente por el sistema de extensión del Natural Resources

Tabla 1. Parámetros de entrada para los modelos WEQ, EWEQ, RWEQ y WEPS.

WEQ (2002) y EWEQ		RWEQ		WEPS	
I	Índice de Erodabilidad de suelo en $t (ha \text{ año})^{-1}$, modificado por riego	I	Irrigación	SF	Factor Suelo: Fracción erosionable (agregados < 0.84 mm), Textura, Agregados, MO, Rugosidad (no orientada y orientada), Costra, Porcentaje de agua, capacidad de campo, infiltración, etc.
K	Rugosidad orientada de la superficie del suelo.	T	Labranzas: Rugosidad orientada y no orientada de la superficie y degradación de la rugosidad	CF	Factor Climático: Velocidad y dirección del viento. Temperatura, Precipitación, Radiación solar.
C	Factor Climático: velocidad y dirección del viento, precipitaciones y temperatura. Modificado por la energía erosiva mensual del viento.	SF	Factor Suelo: Factor de Encostramiento (MO, arcilla y carbonatos de calcio), Fracción Erosionable (agregados < 0.84 mm).	CDF	Factor Cultivo y Descomposición: Índice de área foliar efectivo, índice de silueta aérea e índice de planta efectivo. Residuos a partir del rendimiento del cultivo, desarrollo del canopeo y rendimiento.
L	Longitud total del campo en función de dirección predominante del viento y forma del predio.	WF	Factor Climático: velocidad y dirección del viento, humedecimiento del suelo, temperatura, cobertura de nieve. Valores quincenales.	HF	Factor Hidrológico: Precipitación, Derretimiento nieve, Irrigación y procesos como Evapotranspiración, infiltración y escurrimiento.
V	Cobertura vegetal verde y seca: cantidad ($kg \text{ ha}^{-1}$), tipo y orientación de la misma.	L	Orientación y extensión del campo. Barreras (densidad y altura).	MF	Factor Manejo: Manipulación de la superficie, biomasa y masa de suelo, Enmiendas de suelo.
COG		COG	Cobertura Vegetal: residuos yacentes, silueta aérea de residuos erectos y crecimiento del canopeo del cultivo y descomposición de residuos		
Res	1 año	Res	15 días	Res	1 día

Res: resolución del modelo, MO: materia orgánica.

Conservation Service (NRCS) norteamericano para definir manejos que minimicen la erosión eólica (Sporcic, com. pers.).

La RWEQ permite estimar la pérdida y transporte de suelo por el viento para una porción de sedimento que se mueve entre la superficie del suelo y los 2 metros de altura para determinadas épocas del año (Fryrear *et al.*, 1998). En la Tabla 1 se presentan los parámetros de entrada del modelo.

La RWEQ permite estimar cambios temporales de las propiedades del suelo. La rutina “manejo” calcula la descomposición de residuos y la degradación de la rugosidad, basándose en condiciones climáticas y de suelo (Fryrear *et al.*, 1999).

El modelo WEPS predice la erosión del suelo a través de la simulación de los procesos fundamentales que controlan la erosión eólica, teniendo una resolución temporal diaria (Wagner, 2004). La WEPS permite calcular el movimiento del suelo, daños en la vegetación y predecir emisiones de PM-10 (partículas menores a 10 micrones) cuando la velocidad del viento excede el umbral de erosión (Wagner, 2004). La WEPS también ayuda en el cálculo, tanto fuera como dentro del sitio, de los costos económicos de la erosión.

La WEPS contiene 7 submodelos: Hidrológico, Manejo, Suelo, Cultivos, Descomposición, Erosión y Clima y 4 bases de datos: Climática, Suelo, Manejo, Cultivos-Descomposición. Los submodelos fueron diseñados para simular procesos generales que controlan tanto propiedades temporales de la superficie como procesos de erosión. Es un modelo muy exigente en cuanto a la información requerida para algunas de sus subrutinas como la referida al clima, requiriendo 8 observaciones diarias de todos los parámetros involucrados.

Esta alta frecuencia de información es la mayor limitación para su uso en

Argentina, ya que no se cuenta con una base de datos climática tan detallada, para su calibración. Esta limitante también se presenta para parámetros de cultivos y de suelo.

Debido a que la RWEQ permite calcular la descomposición de residuos y la degradación de la rugosidad superficial basándose en condiciones climáticas y de suelos ocurridas durante el período de medición de la erosión eólica, sumado a que la base de datos climáticos, de cultivos y de suelo con los que se cuenta en Argentina alcanzan a cubrir los requerimientos del modelo, se puede asumir que este es el más apropiado para este estudio.

1.5. Ecuación Revisada de la Erosión Eólica (RWEQ)

1.5.1. Principales Características

La RWEQ utiliza datos mensuales de clima, suelo, campo y manejos, incluyendo en éste último datos de sistemas de cultivos, operaciones de labranzas y descripciones de barreras eólicas. Para ello cuenta con una serie de subrutinas:

Clima: incluye datos climáticos mensuales de viento, lluvia, radiación solar, temperatura y cobertura de nieve.

Manejo: contiene propiedades del suelo, geometría del campo, operaciones de labranza, rugosidad, irrigación, cobertura y barreras eólicas. Incluye los siguientes sub-modelos:

Suelo: contempla textura, porcentaje de arena, limo, MO, carbonato de calcio y cobertura de roca, permitiendo estos datos calcular la fracción erodable del suelo, la costra superficial y la degradación de la rugosidad.

Terreno: incluye información de tamaño, forma y orientación del terreno, y longitud y gradiente de la pendiente para cuantificar el efecto de las colinas.

Cobertura vegetal: calcula la cobertura y descomposición de residuos planos, silueta aérea de residuos erectos y canopeo.

Rugosidad: el efecto de las operaciones de labranzas se expresa a través de la rugosidad orientada y la rugosidad no orientada o natural. Además, las operaciones de labranza pueden disturbar la superficie del suelo destruyendo la costra y enterrar o aplanar los residuos presentes en el suelo (Nelson *et al.*, 1993), dependiendo ésto, de la textura del suelo, tipo de residuos, herramientas utilizadas y condición de humedad al momento de realizar las operaciones.

Irrigación: el impacto del agua de riego está incluido en la descomposición de residuos, degradación de la rugosidad y desarrollo de la costra superficial. Teniendo un efecto similar a las lluvias y riego por aspersión.

Barreras eólicas: se tiene en cuenta la densidad, espaciamiento, altura y orientación de barreras de vegetación.

El modelo permite estimar, a partir de condiciones de campo ya calculadas con las subrutinas antes descritas, la Capacidad Máxima de Transporte (Q_{max}) y la Longitud Crítica del Terreno (s). El valor de Q_{max} para un evento particular se obtiene computando los siguientes datos: WF (factor climático), EF (fracción erodable), SCF (factor de encostramiento), K' (factor de rugosidad) y COG (factor combinado de cultivo que incluye las tasas relativas

de erosión de los residuos yacentes, residuos erectos y canopeo de cultivo).

Además, para este modelo, se ha desarrollado una planilla de cálculo (Excel) que permite estimar la pérdida de material en una tormenta particular (Zobeck, com. pers.).

Si bien el modelo es de dominio público y uso libre, sus parámetros y ecuaciones deben ser validados para cada sitio. Ajustes locales de rugosidad y cobertura son fundamentales para estimar el material erosionado por el viento con una frecuencia de 15 días. Para suelos de Argentina, particularmente de la RSPC, se han hecho algunos ajustes de cobertura vegetal (Mendez y Buschiazzo, 2008) y de factor climático (Panebianco y Buschiazzo, 2008) y en este estudio se pretende desarrollar las variables rugosidad del suelo y velocidad umbral para mejorar la eficiencia predictiva de la RWEQ en la RSPC.

1.5.2. El Parámetro Rugosidad del Suelo en la RWEQ

El efecto de las herramientas de labranza sobre la superficie del suelo es característico para cada labranza y región. Descripciones precisas de las condiciones de rugosidad orientada y no orientada del suelo, así como la incidencia de diferentes factores sobre su degradación son fundamentales para estimar y controlar la erosión eólica. Chepil y Woodruff (1954) estimaron que la erosión eólica de un suelo desnudo y sin rugosidad puede reducirse de 5.6 a 0.056 kg m⁻² con una simple operación con lister.

El método de la cadena (Saleh, 1993) es utilizado por la RWEQ para expresar la rugosidad natural o no orientada (Crr). Este método considera la relación entre la longitud de una cadena extendida sobre una superficie lisa (L1, cm) y la longitud de la cadena sobre la superficie rugosa (L2, cm) y su

expresión matemática es:

$$Crr = (1-L2/L1)*100 \quad \text{Ec. [2]}$$

La RWEQ utiliza además una expresión matemática para calcular el índice RR en base a mediciones realizadas con el método de la cadena (Crr, cm) (Saleh, 1997).

Zingg y Woodruff (1951) desarrollaron una ecuación matemática para la rugosidad orientada (Kr, cm) que relaciona la altura (RH, cm) de los camellones con el espaciamiento entre los mismos (RS, cm).

$$Kr = 4 [(RH)^2 / (RS)] \quad \text{Ec. [3]}$$

El modelo RWEQ incluye una tercera expresión matemática denominada factor de rugosidad del suelo (K') que es utilizado para describir el efecto de la rugosidad sobre la pérdida de suelo por erosión. K' conjuga las dos rugosidades y tiene en cuenta su orientación de acuerdo a la dirección dominante del viento (Anexo-1). Cuando el viento es paralelo a los camellones, K' incluye solamente a la rugosidad no orientada del suelo (Crr) (Allmaras *et al.*, 1966; Zobeck y Onstad, 1987), en cambio, cuando el viento es perpendicular a los camellones, K' incluye tanto a la rugosidad no orientada (Crr) como la orientada (Kr). En dicha ecuación, el valor de Kr debe ser corregido por el ángulo del viento (A, en grados) respecto a los camellones expresado a través de un coeficiente rotacional (Rc) (Saleh, 1994). Cuando el viento sopla paralelo a los camellones A es igual a 90° y cuando la dirección es perpendicular a los camellones A es igual a 0°.

1.5.3. Degradación de la Rugosidad del Suelo en la RWEQ.

La rugosidad del suelo es un factor dinámico en el control de la erosión eólica ya que puede ser rápidamente modificada por el tipo y dirección de las herramientas de labranza y por el clima, principalmente las lluvias.

Observaciones de campo indican que la degradación de los camellones se produce a una tasa totalmente diferente que la de los agregados, por esta razón es que se necesitan ecuaciones diferentes. Saleh (1997) desarrolló una ecuación para evaluar la degradación de las rugosidades no orientada (RRR, Ec. [4]) y orientada (ORR, Ec. [5]) utilizando la cantidad la lluvia acumulada (CUMR, mm) y el índice de erosividad acumulado de las lluvias (CUMEI, Mj-mm (ha-h)⁻¹).

$$RRR = e \text{ EXP [DF (-0.0009 CUMEI - 0.0007 CUMR)]} \quad \text{Ec. [4]}$$

$$ORR = e \text{ EXP [DF (-0.025 CUMEI}^{0.31} - 0.0085 \text{ CUMR}^{0.567})] \quad \text{Ec. [5]}$$

donde RRR es el cociente de Crr antes y después de la lluvia y ORR es el cociente de Kr antes y después de la lluvia.

El índice *EI* es función de la intensidad (*I*) y la energía (*e*, en Mj (ha-mm)⁻¹) de la lluvia (USDA, 1978). Esta variable tiene gran peso en la RWEQ para evaluar la degradación de la rugosidad. La energía de la lluvia se obtiene con la Ec. [6] (Foster *et al.*, 1981) para $i \leq 76 \text{ mm h}^{-1}$:

$$e = 0.119 + 0.0873 * \log i \quad \text{Ec. [6]}$$

Además, el modelo RWEQ considera que la degradación de los camellones y agregados del suelo depende de la textura del mismo, incorporando en la ecuación un factor denominado de degradación (DF, Ec. [7])

que es función de parámetros como contenidos de MO y arcilla (A). La estabilidad de los agregados del suelo se incrementa hasta un 31% de arcilla y disminuye con contenidos mayores de arcilla (Potter *et. al.*, 1990).

$$DF = e \text{ EXP } [0.943 - 0.07 A + 0.0011 (A)^2 - 0.674 \text{ MO} + 0.12 (\text{MO})^2] \quad \text{Ec. [7]}$$

1.6. Fundamentos y Planteos de Hipótesis

1.6.1. Velocidad Umbral

La velocidad umbral es la velocidad que debe alcanzar el viento para que se inicie el proceso de erosión eólica. Es una variable muy sensible a las condiciones climáticas y de la superficie del suelo de cada sitio, por lo que su cálculo debe ser realizado *in situ*.

Los modelos de predicción de la erosión eólica utilizan un único valor de velocidad umbral (μt) para diferenciar entre períodos de altas velocidades de viento, donde el suelo se puede erosionar, y los períodos de calma. Cambios en el valor de μt indican que la superficie del suelo se vuelve más erosionable con el tiempo (Stout y Zobeck, 1996).

Conocer el valor de velocidad umbral del viento para condiciones naturales de campo es muy difícil debido a la intermitencia de la actividad de saltación (Stout, 2004), y a la dificultad de obtener mediciones seguras de variables climáticas y edáficas con una alta frecuencia de medición.

Entre los factores que gobiernan μt , se cuenta el tamaño de las partículas y la humedad en los primeros cm del suelo (Cornelis *et al.*, 2004).

Chepil (1956) consideró que la humedad del suelo afecta las tasas de erosión eólica dependiendo de la textura de los suelos y de las fuerzas de cohesión

entre partículas.

El contenido de humedad del suelo aparece como uno de los factores que más afecta a la velocidad umbral (Belly, 1964; Saleh y Fryrear, 1995; Chen *et al.*, 1996) contribuyendo, a través de efectos de capilaridad y adhesión, a que las partículas estén unidas entre sí (McKenna-Neuman y Nickling, 1989). A pesar de los estudios realizados, aún no es bien comprendido el efecto que tiene la humedad del suelo sobre los valores de velocidad umbral (Namikas y Sherman, 1995; Shao, 2000; Cornelis y Gabriels, 2003). Se han encontrado fuertes influencias de la temperatura (Gregory y Darwish, 1989; McKenna-Neuman, 2003) y de la humedad relativa del aire cerca de la superficie del suelo (Ravi *et al.*, 2004, 2006).

Estimaciones precisas de erosión eólica en áreas semiáridas requieren del cálculo real de μ_t , teniendo en cuenta la variabilidad estacional propia de las precipitaciones en estos ambientes, la que puede afectar la erodabilidad del suelo.

Hipótesis 1

La velocidad umbral del viento variará en función de las condiciones climáticas existentes a lo largo del año.

1.6.2. Rugosidad de la Superficie del Suelo y Precipitaciones.

Muchos autores consideran a la rugosidad de la superficie del suelo como una propiedad dinámica del mismo, debido a que puede variar temporalmente de acuerdo a las condiciones climáticas y de manejo. Merrill *et al.* (2001) la consideran un índice de erodabilidad ya que es útil para indicar la resistencia o vulnerabilidad de un suelo a la erosión.

Para la mayoría de los suelos agrícolas, el clima y los sistemas de labranza son los factores que mayor incidencia poseen sobre el microrelieve de la superficie del suelo. En general, las lluvias disminuyen la rugosidad de la superficie y las labranzas pueden aumentarla o disminuirla, dependiendo de la herramienta y las condiciones del suelo al momento a realizar las operaciones (Zobeck y Onstad, 1987).

Entre los factores climáticos, la precipitación, principalmente a través de su intensidad y magnitud, es el que mayor efecto tiene sobre la degradación de la rugosidad (Allmaras *et al.*, 1966; Zobeck y Onstad, 1987; Zobeck, 1991). Las ecuaciones utilizadas para determinar la degradación de la rugosidad orientada y no orientada dentro del modelo RWEQ consideran como parámetro fundamental de este proceso la energía y cantidad de lluvia y un factor de estabilidad de los agregados en función del % de arcilla y contenido de MO. Los agregados del suelo con contenidos de arcilla superiores al 31% tienen una menor estabilidad, que hace que se rompan tan rápido como los agregados de suelos arenosos (Potter *et al.*, 1990; Saleh, 1997).

La rugosidad no orientada del suelo (RR) disminuye cuadráticamente con incrementos de la energía de lluvia en diferentes tratamientos de labranzas, disminuyendo un 38% del valor inicial luego de una lluvia de 200 Mj-mm (ha-h)⁻¹ (Eltz y Norton, 1997).

La altura de los camellones disminuye con incrementos de la precipitación, dependiendo su persistencia de la altura inicial de los mismos (Lyles y Tatarko, 1987), la cual queda definida según el implemento de labranza seleccionado y las condiciones del suelo al momento de la operación. En general, la tasa de degradación de Kr disminuye con incrementos del

valor de la altura inicial (Zobeck y Popham, 2001).

Saleh (1997), luego de analizar un evento de lluvia, también llegó a la conclusión de que la tasa de degradación de los camellones es más lenta que la de los agregados y que ambas tasas están influenciadas por su valor inicial de rugosidad.

Para poder predecir el efecto del viento sobre la superficie del suelo se requieren descripciones precisas de las condiciones de rugosidad orientada y no orientada de la superficie del suelo, así también como la incidencia de diferentes factores sobre su degradación. Por esa razón, los modelos utilizados para predecir erosión eólica consideran a la rugosidad y a su degradación entre los 5 factores determinantes del proceso. Resulta, entonces, indispensable evaluar la dinámica de este parámetro y calibrar las ecuaciones para cada ambiente.

Hipótesis 2a

Cantidades o energías similares de lluvia degradarán más la rugosidad superficial de un Ustipsamment que la de un Haplustol.

Hipótesis 2b

La degradación relativa de la rugosidad orientada por efecto de la lluvia será menor para herramientas de labranza que produzcan mayor rugosidad.

Hipótesis 2c

Las ecuaciones propuestas por el modelo RWEQ permitirán evaluar la degradación de la rugosidad no orientada y orientada en los suelos de la RSPC.

1.6.3. Rugosidad y Erosión Eólica.

La rugosidad, tanto no orientada como orientada, es un parámetro que afecta significativamente la erosión eólica, principalmente en suelos cultivados (Fryrear y Skidmore, 1985; Arika *et al.*, 1986). La efectividad de una herramienta de labranza para controlar la erosión depende del tipo, tamaño y orientación de los camellones y agregados sobre la superficie del suelo que ésta produce (Lyles, 1985), lo que es condicionado por algunas variables, entre ellas, la textura de los suelos (Fryrear, 1984).

Algunos de los pocos estudios realizados en la RSPC, bajo condiciones de suelos sin cobertura y sin rugosidad, demostraron que existen mayores tasas de erosión en un Ustipsamment típico ($270 \text{ t (ha.año)}^{-1}$) que en un Hapustol éntico ($40 \text{ t (ha.año)}^{-1}$) (Aimar, 2002). Otros estudios han demostrado que suelos con texturas arenosas se ven cuantitativamente más afectados por el proceso de erosión, es decir que sufren erosiones de mayor magnitud (Lyles y Tatarko, 1986; Buschiazzo y Taylor, 1993; Aimar, 2002), mientras que suelos de texturas francas ven más afectada su calidad (Aimar, 2002).

Buschiazzo *et al.* (2000) demostraron, en Haplustoles énticos, que sistemas de labranza convencional, que producen una alta rugosidad ($K_r = 0.9$) provocan tasas de erosión más bajas que la labranza vertical, que genera una rugosidad orientada menor ($K_r = 0.2$). Otros autores demostraron que el laboreo del suelo con cincel a 10 - 15 cm de profundidad reduce un 50% el flujo vertical de partículas, comparado con la labranza convencional con arado de rastra a 30 – 35 cm de profundidad (Lopez *et al.*, 1997).

Armbrust *et al.* (1964) demostraron que existe una altura crítica de los camellones, por encima de la cual se incrementa la velocidad del viento en las

crestas, generando mayor erosión eólica. Camellones con una altura de 5.1 a 10.2 cm fueron efectivos para controlar la erosión eólica debido al entrapamiento de partículas entre los camellones y a la disminución de la velocidad promedio del viento. Por encima y por debajo de estas alturas el control de la erosión no fue efectivo.

En general, a medida que la altura de los camellones aumenta, la tasa de erosión eólica disminuye, siendo más efectivo el control cuando mayor es el porcentaje de superficie de suelo cubierto por agregados no erosionables (>0.84 mm). Los camellones pueden reducir la erosión eólica por encima del 50 % (Armbrust *et al.*, 1964).

Hipótesis 3a

Mayores rugosidades de la superficie del suelo disminuirán la erosión eólica.

Hipótesis 3b

La rugosidad de la superficie de un Haplustol éntico será más eficiente para controlar la erosión eólica que la de un Ustipsamment típico.

1.7. Objetivos

Objetivo 1:

Calcular la variabilidad anual y estacional de la velocidad umbral del viento para dos suelos característicos de la RSPC.

Objetivo 2:

a) Estimar la degradación del parámetro *Rugosidad* en función de diferentes intensidades de lluvia, en dos suelos representativos de la RSPC.

b) Evaluar las tasas de degradación de las rugosidades no orientada y orientada, ésta última producida por tres herramientas de labranza comúnmente utilizadas en la RSPC.

c) Validar las ecuaciones de degradación de la rugosidad del modelo con los datos medidos a campo en condiciones controladas.

Objetivo 3:

a) Evaluar la incidencia del parámetro *Rugosidad* sobre la magnitud de la erosión eólica.

b) Evaluar la eficiencia de la rugosidad orientada y no orientada para controlar la erosión eólica en dos suelos característicos de la RSPC.

CAPITULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de Estudio

El área de estudio de la presente investigación forma parte de la región Semiárida Pampeana Central (RSPC), más precisamente la Región Oriental de la Provincia de La Pampa. Dentro de esta región se diferencian, por relieve y litología, 4 subregiones geomorfológicas (Figura 3, INTA *et al.*, 1980):

I Subregión de las Planicies con Tosca.

II Subregión de las Colinas y Lomas.

III Subregión de las Planicies Medanosas.

IV Subregión de las Mesetas y Valles.

Este estudio se llevó a cabo en dos sitios ubicados en la subregión Planicies con Toscas. Esta subregión abarca una superficie aproximada de 8.500 km² y se encuentra en la parte NE de la provincia, entre los meridianos 63°45' y 64°30' W y los paralelos 35° y 36°30' S y se caracteriza por poseer un clima subhúmedo – seco. La precipitación media anual varía entre 550 y 650 mm, existiendo una gran variabilidad tanto en los totales mensuales como en los totales anuales, siendo esto característico de las regiones áridas y semiáridas (INTA *et al.*, 1980).

Los vientos tienen un comportamiento similar en toda la provincia, predominando del N-NE y S-SW. La velocidad promedio anual del viento oscila entre 10 y 15 km h⁻¹, siendo la primavera la estación en que sopla con mayor intensidad. Esto coincide con el final del período de menor precipitación y frecuentes labranzas que tienen como objetivo la preparación del suelo para los cultivos de verano (Aimar, 2002 y Buschiazzo, 2006), lo que contribuye a aumentar los riesgos de erosión eólica.

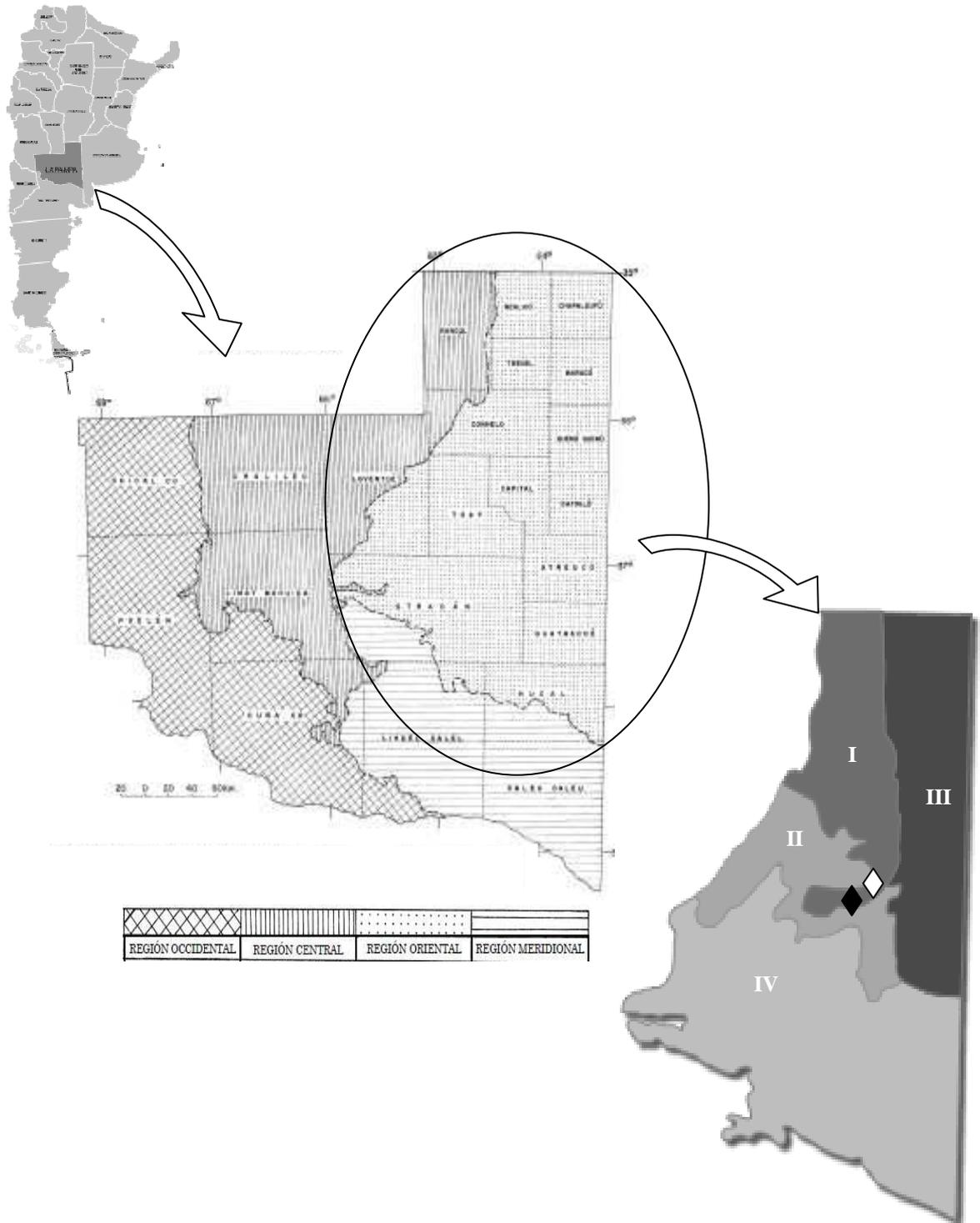


Figura 3. Ubicación del área de estudio: ♦ Sitio I y ◇ Sitio II.

El relieve es uniformemente plano, muy suavemente ondulado, con una pendiente regional SW-NE. El microrelieve está compuesto por pequeñas

lomas y depresiones (INTA *et al.*, 1980).

El material parental es de origen eólico y en él predominan texturas franco arenosas y franco arenosas finas. Los suelos tienen una mayor evolución respecto a los suelos de las otras regiones y sus horizontes están claramente diferenciados. Se aprecia una ganancia en el perfil de contenido de MO, predominando Molisoles con regímenes de humedad ústico y de temperatura térmico, que pertenecen al gran grupo de los Haplustoles énticos y típicos, principalmente. En segundo lugar en cuanto a distribución areal se encuentran los Entisoles con regímenes de humedad ústico y de temperatura térmico, que pertenecen al gran grupo de los Ustipsamment típicos principalmente (INTA *et al.*, 1980). El paisaje actual es modelado por acciones hídricas y eólicas, dando origen a mesetas, valles, colinas y planicies. La vegetación está compuesta de cultivos de cosecha como sorgo, maíz, trigo y cultivos de forraje como centeno, avena y cebada. Además, de pastizales bajos, bosques abiertos caducifolios y pastizales sammófilos (INTA *et al.*, 1980).

2.2. Sitios Experimentales

Se seleccionaron dos sitios cuyos suelos son representativos de los dominios edáficos más difundidos en la RSPC (Fig. 3). El Sitio I estuvo ubicado en el Campo Experimental de la Facultad de Agronomía y Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Pampa (36° S; 64° W) en el cual evolucionan Haplustoles énticos. El Sitio II está ubicado en el Campo Experimental de INTA Anguil (36° S; 64°25' W), donde evolucionan Ustip sammentes típicos.

El suelo del Sitio I posee una secuencia de horizontes A-AC-C-C_k. Su

horizonte A posee una textura franco-arenosa con 109 g kg^{-1} de arcilla, 193 g kg^{-1} de limo y 698 g kg^{-1} de arena, 16.5 g kg^{-1} de MO y 64.2 mg kg^{-1} de fósforo disponible (Bray-Kurtz I). Su capacidad de campo es 13.6% , posee un pH de 6.6 y la conductividad eléctrica de su extracto de saturación es 0.15 dS m^{-1} .

El suelo del Sitio II tiene una secuencia de horizontes A-AC-C y su textura es arenosa-franca, con un 69 g kg^{-1} de arcilla, 95 g kg^{-1} de limo y 810 g kg^{-1} de arena, de la cual, el mayor porcentaje, corresponde a arenas finas y muy finas. Su horizonte A posee 22 g kg^{-1} de MO y 66.9 mg kg^{-1} de fósforo disponible (Bray-Kurtz I). Su capacidad de campo es 7.8% , posee un pH de 5.6 y una conductividad eléctrica del extracto de saturación de 0.3 dS m^{-1} .

2.3. Metodologías Propuestas para Validar la Hipótesis 1

Para determinar la velocidad umbral bajo condiciones climáticas variables se realizaron mediciones en la parcela de referencia (PR) de 1 ha (Fig. 4) del Sitio I. Esta parcela se caracterizó por tener condiciones para que ocurra la máxima erosión y se la mantuvo sin cobertura vegetal ni rugosidad



Figura 4. Vista general de la parcela de referencia (PR)

superficial. Estas condiciones se lograron con labranzas frecuentes con rastra de discos.

En la parcela PR se instaló, en el centro, una estación meteorológica Davis Vantage Pro2 Plus inalámbrica, que registró la velocidad y la dirección del viento a 2 m de altura, la temperatura, la radiación y la precipitación, en todos los casos con una frecuencia de 1 minuto (Fig. 5).



Figura 5. Vista de la estación meteorológica portátil y sus componentes.

El datalogger de la estación meteorológica también almacenó, con una

frecuencia de 1 min, la información de un SENSIT (Fig. 6). El SENSIT es un sensor piezoeléctrico, cuyo funcionamiento se basa en la detección del impacto de partículas movilizadas por saltación sobre un diodo sensible de cristal de cuarzo. El dato de salida es una señal de pulsos proporcional al número de partículas impactantes (Stockton y Gillette, 1990). Este dato permite calcular la duración de cada tormenta erosiva y el momento exacto a partir del cual comienza el proceso de saltación. Esta información permite calcular la velocidad umbral (μt) bajo condiciones reales de viento y de superficie.

El borde inferior del elemento sensible del SENSIT fue colocado a 2 cm de la superficie del suelo y tanto la estación meteorológica como el SENSIT se ubicaron en el centro de la parcela PR (Fig. 6).

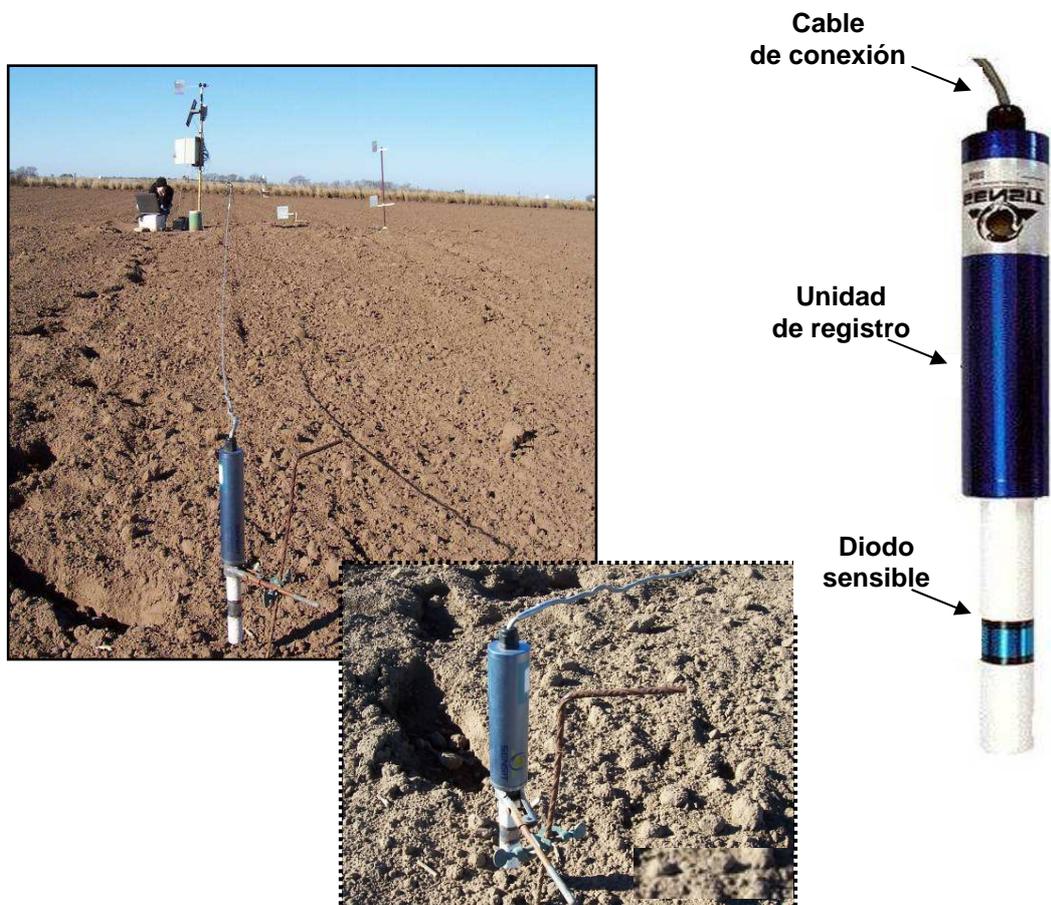


Figura 6. Vista general del SENSIT y sus componentes

La erosión eólica se midió en la parcela PR utilizando colectores de partículas verticales llamados BSNE (Big Spring Number Eight, Fryrear, 1986). La distribución de los puntos de muestreos en la parcela se muestra en la Figura 7. En cada punto se colocaron tres BSNE a 13.5, 50 y 150 cm de altura desde la superficie del suelo.

Los BSNE (Fig. 8) están contruidos de metal galvanizado y constan de una bandeja inferior donde se colecta el material transportado por el viento y una parte superior acoplada a la anterior. La parte superior tiene en su cara inferior una malla de 1 mm de diámetro y en la cara superior una malla de 0.3 mm de diámetro. Las dos partes del colector vistas en planta tienen una forma trapezoidal.

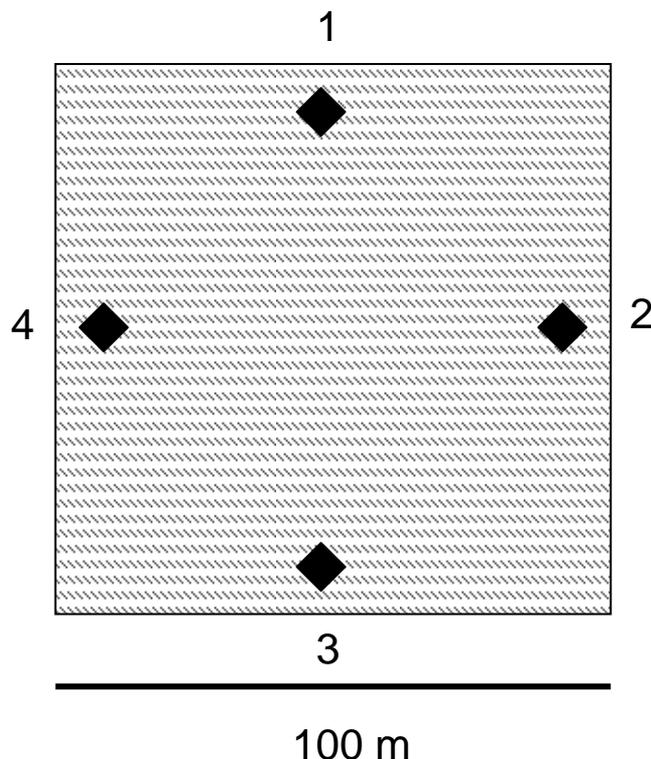


Figura 7. Vista de la distribución espacial e identificación de los colectores BSNE en la parcela de referencia (PR).

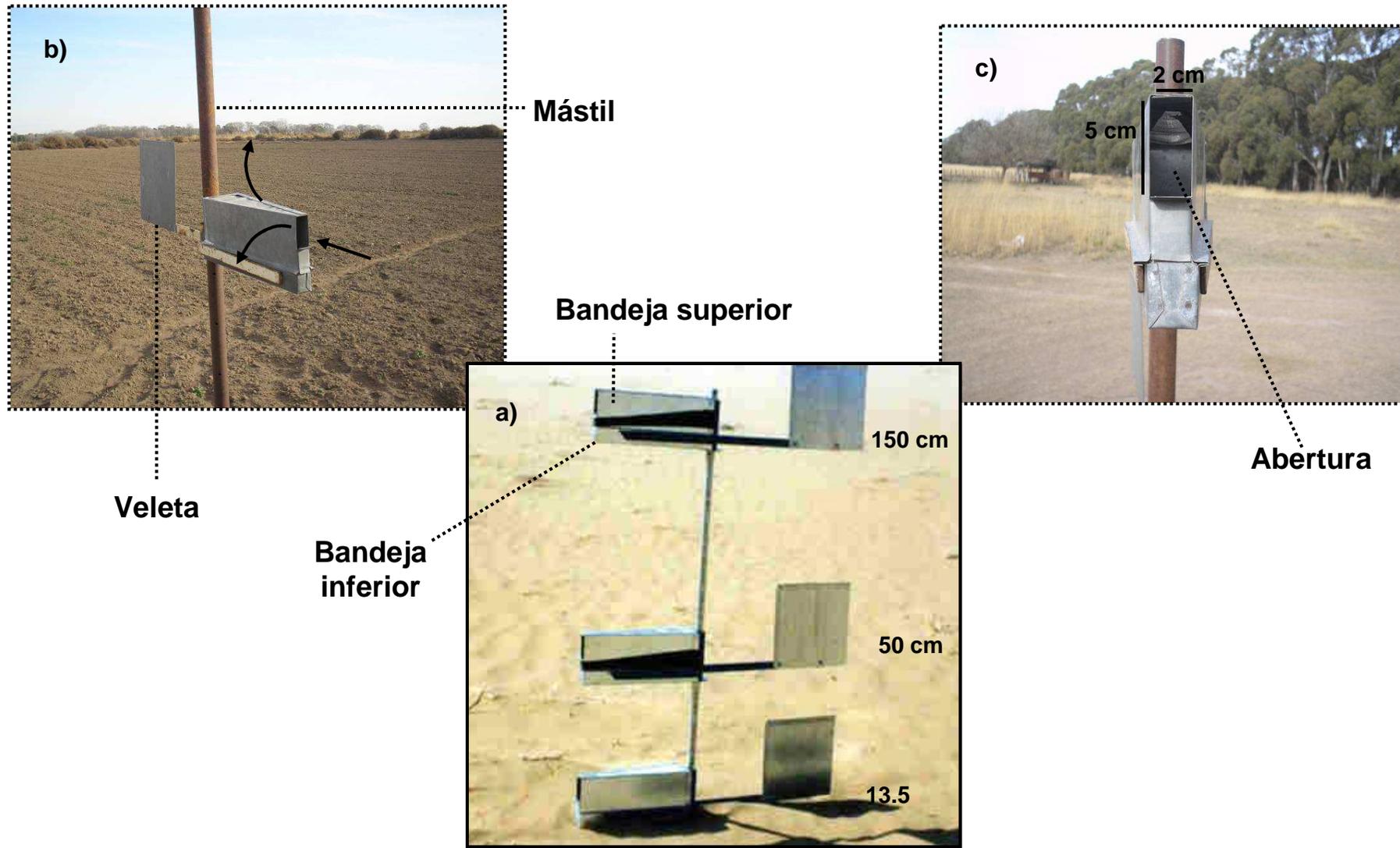


Figura 8. a) Ubicación de colectores BSNE en altura, b) detalle de circulación de aire, c) detalle de la abertura.

El aire cargado de material ingresa al colector por una abertura de 2 cm de ancho y 5 cm de alto ubicada en la base menor del trapecio. Al ingresar al colector, el aire cargado de material pierde velocidad debido a la forma del colector y el material cae a la bandeja inferior del colector atravesando la malla de 1 mm de diámetro. El aire sin material sale a través de la malla de 0.3 mm ubicada en la parte superior del colector. Cada colector se coloca en el extremo de una barra que tiene adosada una veleta, la cual le permite orientarse según la dirección del viento (Aimar *et al.*, 2003).

La cantidad de material erosionado en cada tormenta y parcela se calculó siguiendo los siguientes pasos:

a) cálculo del flujo horizontal de masa (cantidad de material que pasa por cada punto de muestreo en un plano vertical en cada evento erosivo), con la ecuación [8] (Stout y Zobeck, 1996):

$$f(z) = f_0 (1 + z/\sigma)^{-\beta} \quad \text{Ec. [8]}$$

donde $f(z)$ es el flujo horizontal de masa (kg m^{-1}) a la altura z , f_0 es el flujo horizontal de masa sobre la superficie del suelo, y σ y β son coeficientes de regresión.

b) cálculo de la cantidad de material erosionado por hectárea (Q), multiplicando $f(z)$ por 100, el ancho de la parcela (Anexo-2).

c) cálculo de la cantidad neta de material erosionado en la parcela (t ha^{-1}) como la diferencia entre Q del conjunto de colectores colocados a barlovento menos Q del conjunto de colectores ubicados a sotavento en la dirección predominante del viento (Anexo-2).

La velocidad umbral del viento (μt) se calculó con la Ecuación [9] (Stout,

2004):

$$\mu_t = \bar{u} - \sigma * \Phi^{-1}(\gamma) \quad \text{Ec. [9]}$$

donde \bar{u} es la velocidad media del viento en m s^{-1} , σ es la desviación estándar de la velocidad media del viento, γ es la actividad de saltación y Φ^{-1} es la inversa de la función de distribución normal estándar de γ . γ es un valor adimensional y representa el número total de minutos de saltación sobre el total de minutos muestreados, que fue 5 min. La función $\Phi^{-1}(\gamma)$ es indefinida cuando γ toma valores 0 y 1 (Stout, 2004), por lo que la Ec. [9] solo pudo ser aplicada cuando se detectó actividad de saltación y se cumple la siguientes condición $0 < \gamma < 1$.

El promedio de velocidad del viento para el período con actividad de saltación ($\bar{u}_{(\mu_t)}$, m s^{-1}) se obtuvo promediando las velocidades de viento cuando hubo pulsos del SENSIT.

Los cálculos de μ_t se realizaron para cada estación de los años 2003, 2004 y 2005, analizándose, en los tres años, 370 tormentas.

Los valores de μ_t se relacionaron por medio de gráficos con las variables climáticas precipitación, temperatura y humedad relativa (media mensual). La selección de estas variables se debe a que definen, indirectamente, las condiciones de humedad del suelo.

Para caracterizar el clima de cada período de medición se utilizó el cociente entre la precipitación y temperatura, utilizando valores medios mensuales (UNESCO-FAO, 1963).

Los datos de μ_t , $\bar{u}_{(\mu_t)}$, \bar{u} y Q se compararon entre años y entre

estaciones del año con ANOVA simple y las comparaciones de medias con la Prueba de Fisher's (LSD). De ese análisis se excluyeron los datos de μt de todos los otoños, época del año que no presentó suficientes valores de velocidad umbral.

2.4. Metodologías Propuestas para Validar la Hipótesis 2

Se plantearon tratamientos de labranza con el fin de simular condiciones contrastantes de la rugosidad orientada de la superficie del suelo: 1) arado de rastra (DT), 2) sembradora de grano fino (DH) y 3) sembradora lister (LB). El efecto de cada herramienta de labranza sobre la superficie del suelo se ilustra en la Figura 9 y sus características se detallan en la Tabla 2.

Para evaluar el efecto de la lluvia sobre la rugosidad y comprobar si es posible adoptar para los suelos analizados la subrutina SUELOS de la RWEQ, se desarrollaron simulaciones de lluvia con un simulador (Fig. 10). El mismo cuenta con un pico Lechler GmbH de Fellbach Alemania modelo 460.968.30 CG, que fuera evaluado por Rostagno y Garayzar (1995).

El pico aspersor de cono lleno, ubicado a 3.4 m de altura, produce una lluvia que posee un ángulo de salida de 120° y cubre un diámetro de mojado de 4 m (Adema, 2000). El simulador se conecta mediante una manguera de

Tabla 2. Rugosidades producidas por tres sistemas de labranza.

Labranza	Rugosidad Orientada (Fryrear <i>et al.</i> , 1998)	
	Ancho camellón (cm)	Altura camellón (cm)
PR	0	0
DT	30.5	2.54
DH	35.6	5.10
LB	101.6	25.4

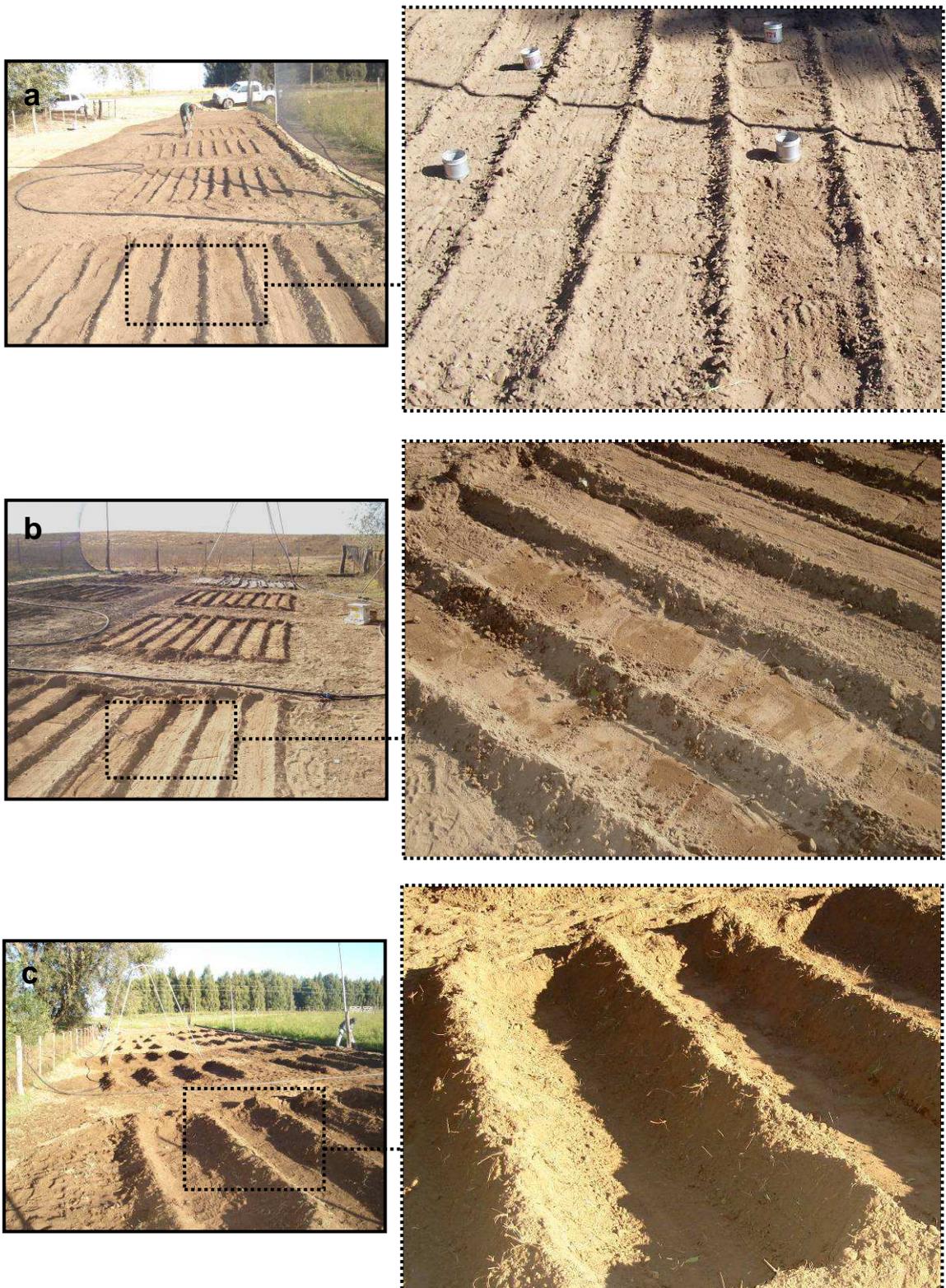


Figura 9. Vista general de la superficie del suelo luego de una simulación de lluvia: a) Arado de rastra (DT), b) Sembradora de grano fino (DH) y c) Sembradora lister (LB).

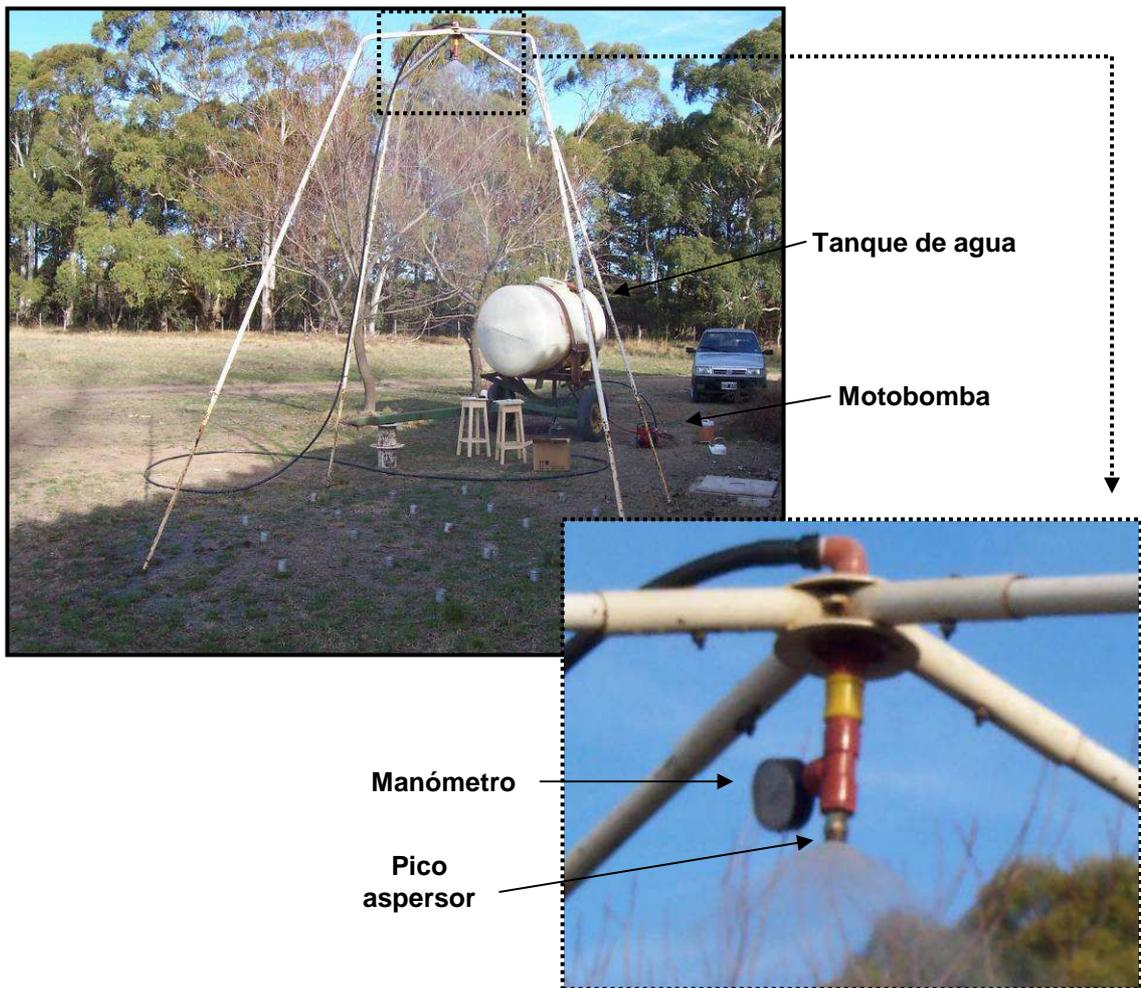


Figura 10. Vista del simulador de lluvia portátil

$\frac{3}{4}$ " a una motobomba Miscela CM 46 que posee un motor de dos tiempos, de 48 cc de cilindrada y 1.75 HP de potencia. Esta bomba aspira agua de un tanque de agua de 2000 L de capacidad.

Las lluvias simuladas tuvieron una intensidad máxima de 42 mm h^{-1} para una presión constante de 1 kg cm^{-2} y la energía de lluvia (e , Mj ha^{-1}) se reguló por medio de la duración de las simulaciones. Los tiempos de las mismas fueron 10' y 40', que representan las siguientes energías: 1.825 y 7.299 Mj ha^{-1} , y cantidad de lluvia 7 y 28 mm, respectivamente. Las energías aplicadas se calcularon con la Ec. [6]. Las simulaciones de lluvia se realizaron

en cada sitio, efectuándose 5 réplicas por cada tiempo de simulación, para cada condición de rugosidad.

Como elemento complementario de la simulación se usó una cortina rompevientos de nylon sostenida por varillas metálicas para lograr una mejor distribución de la lluvia, no obstante las simulaciones se realizaron con velocidades de viento menores a 10 km h^{-1} .

La rugosidad no orientada se midió utilizando el método de la cadena y la rugosidad orientada, el ancho y espaciamiento de los camellones con una cinta métrica (Fig.11). Se realizaron 5 lecturas para cada tipo de rugosidad de manera aleatoria antes y después de cada simulación de lluvia (Fig. 12), que luego se promediaron en un único valor de C_{rr} y K_r , obtenidos con las Ec [2] y [3] respectivamente.

Las tasas de degradación de C_{rr} (RRRm) y de K_r (ORRm) producida por cada simulación de lluvia se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$RRRm = C_{rr_f} / C_{rr_i} \quad \text{Ec. [10]}$$

$$ORRm = K_{r_f} / K_{r_i} \quad \text{Ec. [11]}$$

donde C_{rr_f} y K_{r_f} son la rugosidad no orientada y orientada medidas después y C_{rr_i} y K_{r_i} son las rugosidades medidas antes de cada evento de lluvia.

La tasa de degradación de C_{rr} y K_r también se calculó con las ecuaciones del modelo RWEQ (Ec. [4] y [5], Fryrear *et al.*, 1998), donde ORRc y RRRc están en función de la cantidad y energía de las lluvias y de un factor de degradación dependiente del tipo de suelo.

La tasa de cambio (CH, en %) de C_{rr} y (RRR) y K_r (ORR) medido y calculado se obtuvo por medio de la siguiente ecuación:

$$CH = (ORR_c - ORR_m / ORR_c) * 100 \quad \text{Ec. [12]}$$

La tasa de degradación relativa (D, en %) de Kr y Crr se calculó en términos relativos por medio de la siguiente ecuación:

$$D = 100 - (SR_f / SR_i) * 100 \quad \text{Ec. [13]}$$

donde SR_f es Crr y Kr medida después de un evento de lluvia y SR_i es Crr y Kr medido antes de un evento de lluvia.

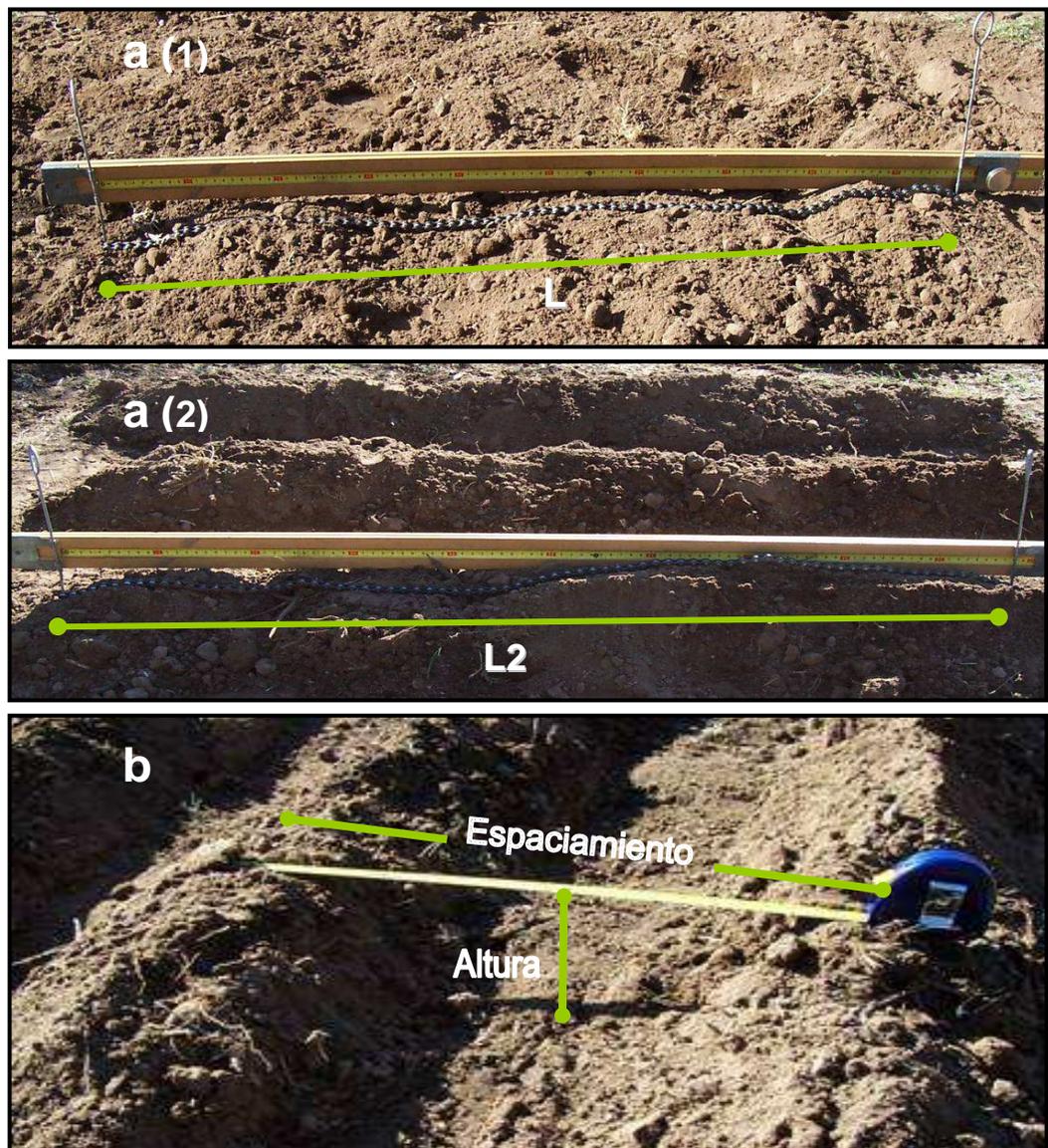


Figura 11. Medición de la rugosidad: a) no orientada sobre (1) la parcela de referencia (PR) y (2) la parcela con camellones y b) Orientada.

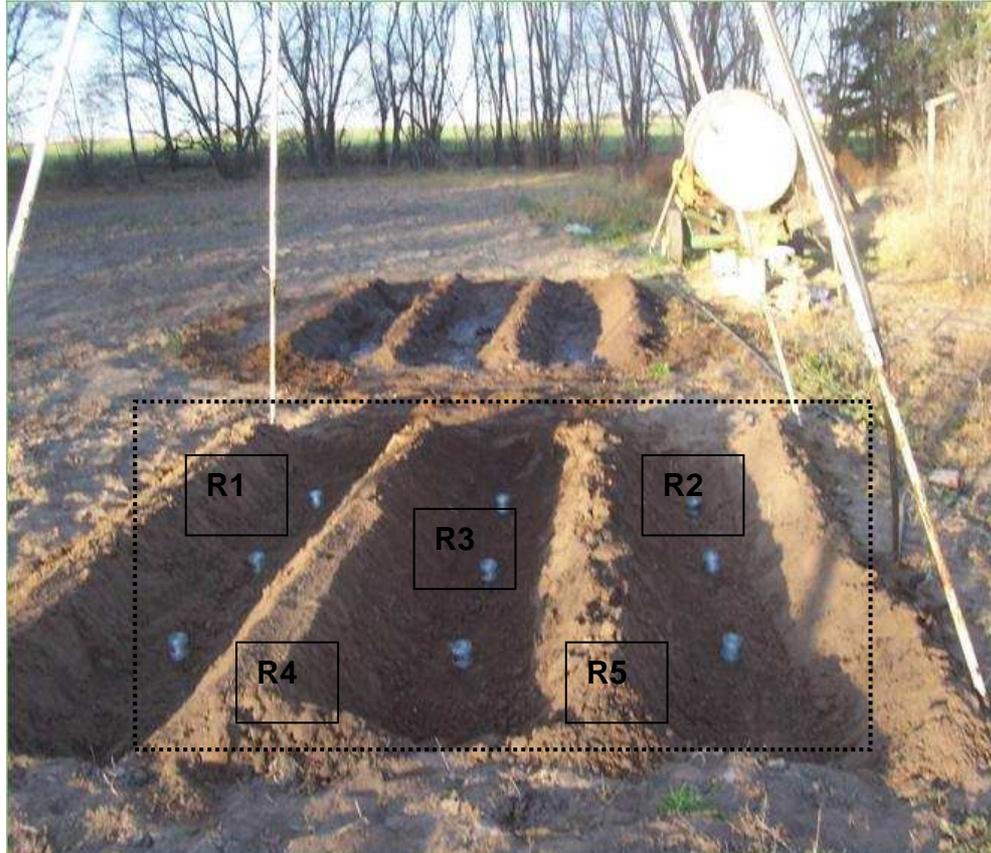


Figura 12. Vista del ensayo de simulación de lluvia. R son las réplicas realizadas para cada tiempo de simulación y condición de rugosidad a evaluar, antes y después de cada simulación.

Para comparar el efecto de cada tratamiento (labranza, tipo de suelo y precipitación- cantidad y energía-) sobre C_{rr} y K_r se utilizó un ANOVA con tres factores fijos y un diseño completamente aleatorizado. Cuando la varianza indicó un efecto significativo del tratamiento en cada parámetro medido, se usó la prueba de Tukey para comparar sus medias.

2.5. Metodologías Propuestas para Validar la Hipótesis 3

La erosión eólica fue simulada con un túnel de viento portátil (Fig.13) a fin de corroborar el efecto de la rugosidad.

Los tratamientos correspondieron a las rugosidades producidas por DT,

DH, LB y PR y los estados degradados de los tres primeros, luego de las simulaciones de 10 y 40 min con simulador de lluvia. Para los tres primeros tratamientos se midió únicamente K_r (rugosidad orientada) para evaluar el cambio de altura y espaciamiento de los camellones luego de cada evento de erosión, mientras que en la PR se midió sólo C_{rr} (rugosidad no orientada).

Ambos tipos de rugosidades se evaluaron utilizando los métodos descritos en la Figura 11 y las Ec [2] y [3].

En cada tratamiento se realizaron simulaciones de erosión con el túnel de viento a tres velocidades: *velocidad baja* (9.5 m s^{-1}), *velocidad media* (16.5 m s^{-1}) y *velocidad alta* (22.5 m s^{-1}). Las velocidades se controlaron con un anemómetro con sistema de tubo Pitot a 50 cm de altura de la superficie del suelo, a la salida del túnel. Tanto la velocidad como el perfil vertical logarítmico del viento fueron calibrados previamente.

Las simulaciones con el túnel duraron 3 minutos en cada tratamiento. Al momento de realizar las simulaciones el suelo poseía, en los primeros 2.5 cm de espesor, contenidos de humedad de aproximadamente el 50 al 60 % de la capacidad de campo.

Todos los tratamientos se realizaron por cuadruplicado y en cada uno de ellos se realizaron 3 lecturas de rugosidad orientada y no orientada, según correspondiese, que luego fueron promediadas para obtener un único valor de C_{rr} , K_r , altura inicial y final de los camellones y el parámetro K' .

El túnel de viento 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

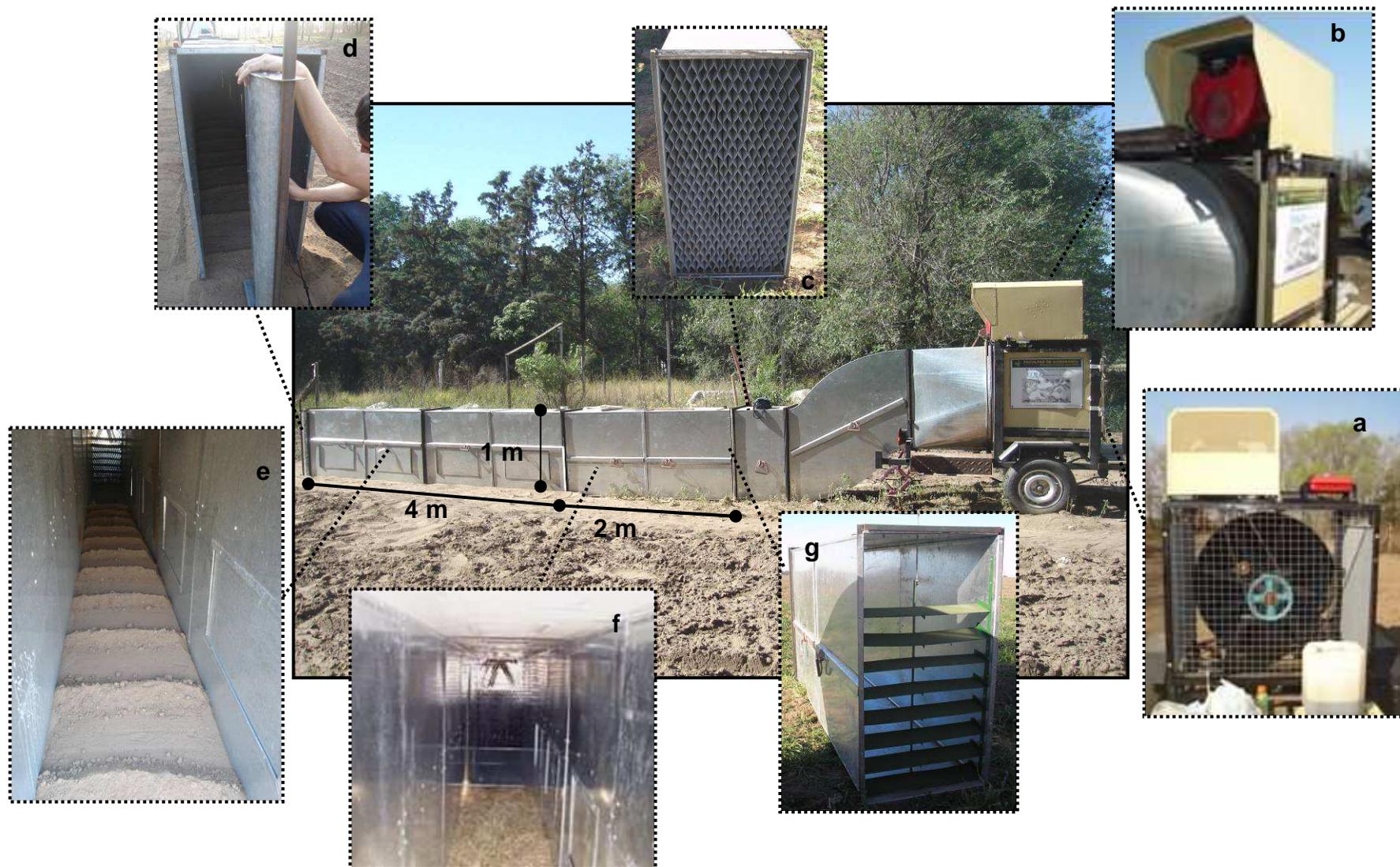


Figura 13. Componentes del túnel de viento portátil. a) hélice, b) motor con carcasa protectora, c) placa cribada, d) salida del túnel y colector entero, e) zona de medición, f) tramo del túnel con piso y g) chapas deflectoras.

las secciones del túnel y la placa cribada. El motor esta 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 esta 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 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. Al final de esta zona se coloca un colector especialmente diseñado para ser utilizado en el túnel. 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 últimos tramos del túnel.

El régimen de revoluciones del motor se controló con un tacómetro digital conectado al cable de bujía y con un anemómetro digital se midió la velocidad del viento a la salida del túnel a 0.5 m del nivel del suelo.

El material erosionado durante las simulaciones fue recolectado a la salida del túnel de viento con un colector que poseía una abertura frontal de 1 mm de ancho y una altura de 1 m (Zobeck *et al.*, 2003). Una vez obtenida la

muestra, el material se pesó a la cuarta cifra decimal.

La Tasa Relativa de Erosión (TRE) se calculó con la Ecuación [14]

$$TRE = T / T_{PR} \quad \text{Ec. [14]}$$

siendo T la cantidad de material erosionado en cada tratamientos y T_{PR} la cantidad de material erosionado en la parcela de referencia.

El Cambio de la Rugosidad orientada (CR) luego de cada simulación de viento se calculó mediante la Ecuación [15]

$$CR = K_{r_f} / K_{r_i} \quad \text{Ec. [15]}$$

siendo K_{r_i} el valor de la rugosidad orientada antes y K_{r_f} el valor de la rugosidad orientada después de realizar cada simulación de viento con el túnel.

Las relaciones entre rugosidad, erosión y tipo de suelo se analizaron por medio de regresiones simples.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados Obtenidos para Validar la Hipótesis 1*

Hipótesis 1.

La velocidad umbral del viento variará en función de las condiciones climáticas existentes a lo largo del año.

La Figura 14 muestra las condiciones ambientales durante el período de medición 2003-2005. La temperatura media mensual tuvo un comportamiento recurrente a lo largo de los tres años de medición siendo el valor promedio estacional mayor en verano (21.4 °C) que en primavera (16.7 °C), otoño (13.1°C) e invierno (9.3°C). La precipitación promedio de los tres años de medición fue mayor en primavera (192.7 mm) y en verano (187.3 mm) que en otoño (149.7 mm) e invierno (86 mm). La humedad relativa del aire fue mayor en otoño (70 %) que en invierno (67 %), en verano (61 %) y primavera (56 %). La dirección predominante del viento fue Norte (30 %), seguido por Sur (19 %), Este (9 %) y calmas (14 %). Considerando únicamente las tormentas donde hubo actividad de saltación (n=70) la dirección predominante del viento fue Norte (46 %), Sur (29 %) y Este (21 %). Estos resultados coinciden con los de Casagrande y Vergara (1996) quienes encontraron tendencias similares para registros de datos de 30 años en la región de estudio, e indican que el Norte-Sur es la dirección del viento con mayor efecto erosivo en la región.

El registro completo de la velocidad media del viento (\bar{u}), la velocidad media del viento para el período con actividad de saltación [$\bar{u}(\mu t)$] y la velocidad

* Estos resultados fueron publicados en: de Oro, L. A. y D.E. Buschiazzo. 2009. Threshold wind velocity as an index of soil susceptibility to wind erosion under variable climatic conditions. Land Degradation & Development 20:14-21.

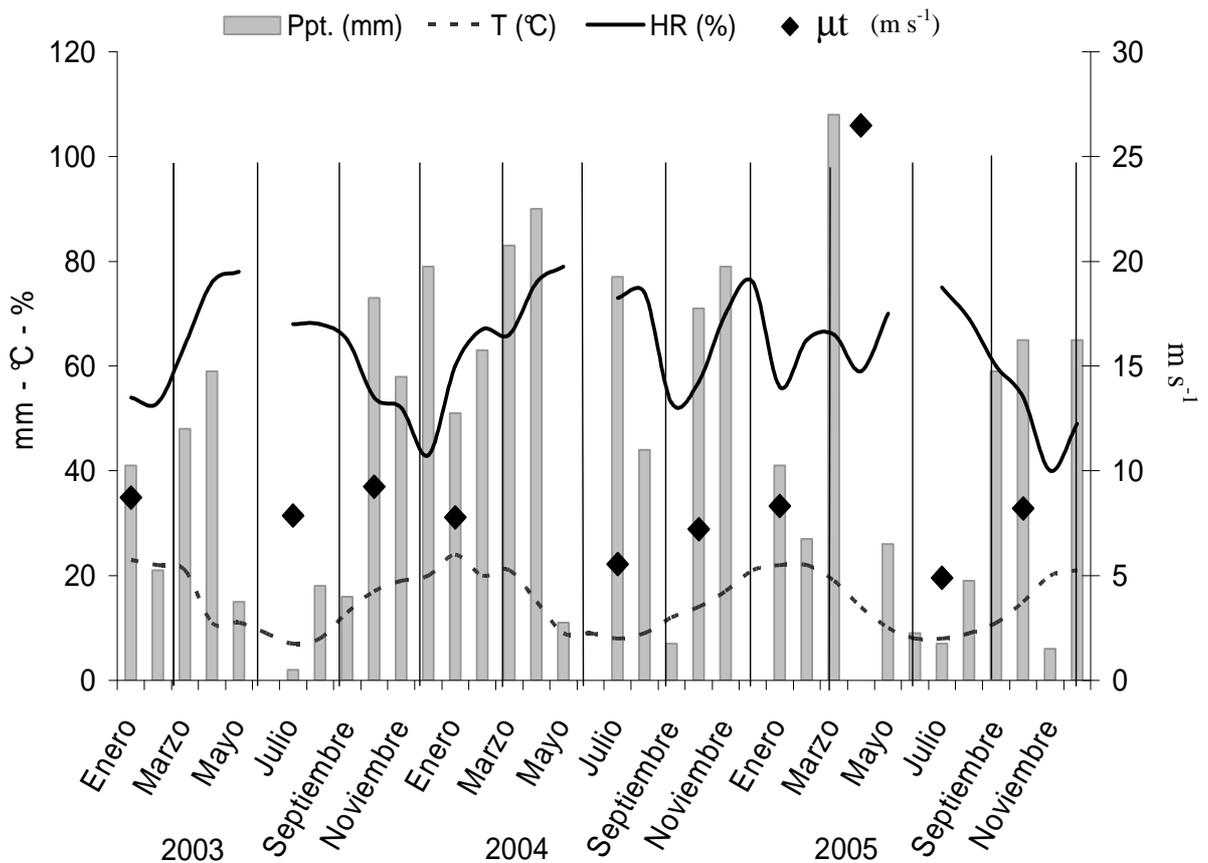


Figura 14. Condiciones climáticas durante el período 2003-2005.

umbral del viento (μt) se presentan en la Figura 15.

De un total de 370 tormentas analizadas, solamente en 70 existió actividad de saltación. El tiempo de duración de esas 70 tormentas fue de 90420 min., de los cuales sólo 1239 min. (1.4 %) presentaron actividad de saltación.

Claramente, la actividad de saltación ocupa un período de tiempo pequeño del total del periodo medido, en acuerdo con resultados presentados por otros autores (Stout y Zobeck, 1996, 1997; Stout, 2003). Esto indica que la actividad de saltación muestra una alta intermitencia debido a la alta variación de los factores climáticos que influyen sobre las condiciones de la superficie del

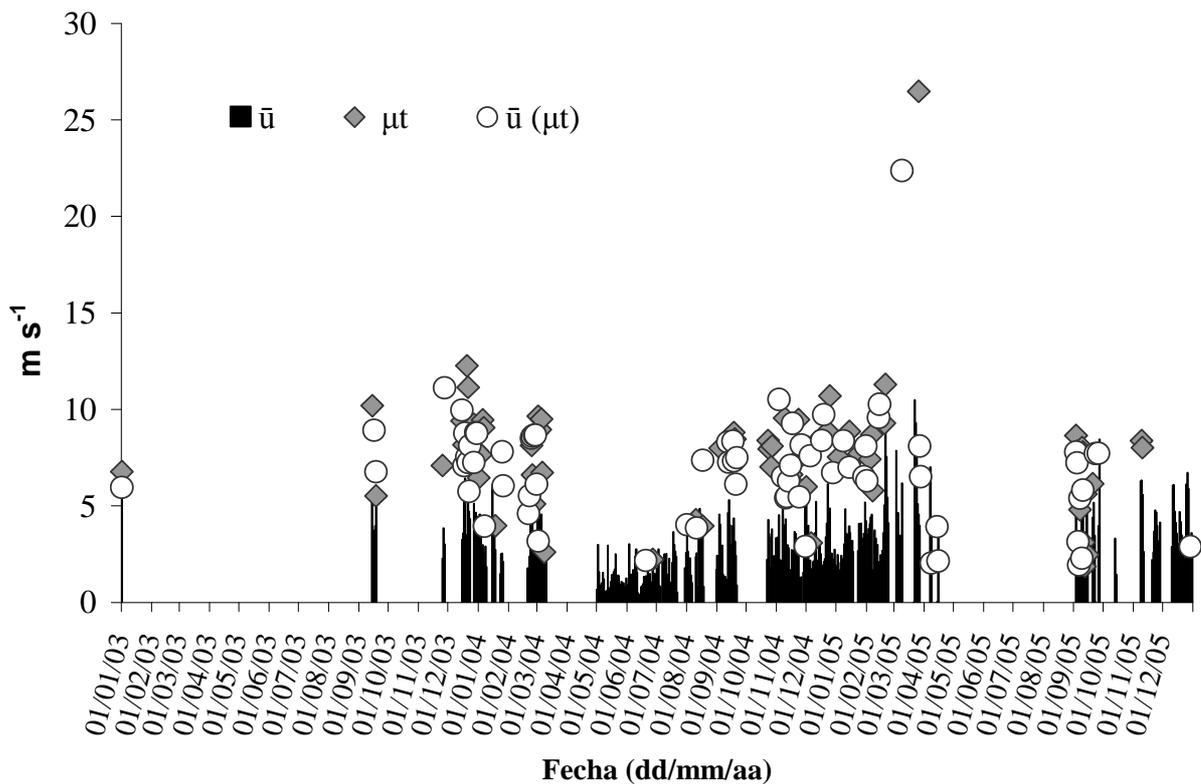


Figura 15. Velocidad media del viento (\bar{u}), velocidad umbral del viento (μt) y velocidad media del viento para el período con actividad de saltación [$\bar{u}(\mu t)$] entre 2003 - 2005.

suelo.

La Tabla 3 muestra que \bar{u} varió entre 1.24 y 4.75 m s⁻¹ con una media de 3.41 m s⁻¹ y un desvío estándar de 1.07 m s⁻¹. El valor de $\bar{u}(\mu t)$ varió entre 4.54 y 8.20 m s⁻¹ con una media de 7.01 m s⁻¹ y un desvío estándar de 1.29 m s⁻¹. El valor de μt varió entre 4.89 a 9.24 m s⁻¹ con una media de 7.53 m s⁻¹ y un desvío estándar de 1.44 m s⁻¹. Los datos de μt y $\bar{u}(\mu t)$ registrados para otoño fueron excluidos del análisis debido a que sólo representaban una tormenta ocurrida en 2005.

El valor medio de μt para todas las tormentas (7.53 m s⁻¹) fue mayor que el valor de μt considerado por la RWEQ (5 m s⁻¹ a 2 m de altura, Fryrear et al., 1998) y menor que el valor considerado por la WEPS (8 m s⁻¹,

Tabla 3. Velocidad umbral del viento (μt), velocidad media del viento (\bar{u}), velocidad media del viento en los períodos con actividad de saltación [$\bar{u}(\mu t)$] y cantidad de material erosionado.

		Verano	Otoño	Invierno	Primavera	Promedio Anual
μt ($m s^{-1}$)	2003	8.72 ^a (n=5)	-	7.87 ^a (n=2)	9.24 ^a (n=4)	8.61 ^b (n=11)
	2004	7.78 ^a (n=17)	Nd	5.55 ^b (n=5)	7.22 ^a (n=15)	6.90 ^a (n=37)
	2005	8.33 ^a (n=8)	26.48 (n=1)	4.89 ^b (n=10)	8.21 ^a (n=3)	7.14 ^a (n=21)
	Promedio estacional	8.28 ^a	26.48	6.10 ^b	8.22 ^a	7.53
$\bar{u}(\mu t)$ ($m s^{-1}$)	2003	7.87 ^a (n=5)	-	7.54 ^a (n=2)	8.20 ^a (n=4)	7.87 ^b (n=11)
	2004	7.29 ^a (n=17)	Nd	5.13 ^b (n=5)	6.94 ^a (n=15)	6.45 ^a (n=37)
	2005	7.86 ^a (n=8)	22.38 (n=1)	4.54 ^b (n=10)	7.72 ^a (n=3)	6.71 ^a (n=21)
	Promedio estacional	7.67 ^a	22.38	5.74 ^b	7.62 ^a	7.01
\bar{u} ($m s^{-1}$)	2003	4.75 ^a (n=7)	-	4.17 ^a (n=6)	3.87 ^a (n=9)	4.26 ^a (n=22)
	2004	3.14 ^a (n=46)	1.24 ^d (n=51)	2.20 ^c (n=67)	2.67 ^b (n=60)	2.31 ^b (n=224)
	2005	3.44 ^{ab} (n=68)	4.72 ^a (n=12)	3.20 ^b (n=13)	4.00 ^{ab} (n=31)	3.84 ^a (n=124)
	Promedio estacional	3.77 ^a	2.98 ^c	3.19 ^{bc}	3.51 ^{ab}	3.41
Cantidad de material erosionado ($t ha^{-1}$)	2003	32.94	-	0	1.81	11.58 ^a (n=5)
	2004	3.89	0	0.02	2.47	1.60 ^b (n=7)
	2005	1.81	0	0.48	5.04	1.83 ^b (n=7)
	Promedio estacional	12.88 ^a	0 ^b	0.17 ^b	3.11 ^b	5.00

Valores seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0.05$), nd: No detectado, n: Número de tormentas, — No medido.

Wagner, 2004). El valor de μt encontrado en este trabajo fue estimado a partir de intervalos de tiempo de 1 min., promediado luego a 5 min. Se sabe que el valor de μt disminuye a medida que aumenta el tiempo promediado (Stout, 1998), con lo cual es posible deducir que su valor podría ser algo mayor que 7.53 m s^{-1} si el período de tiempo considerado para su cálculo hubiera sido algo menor que el utilizado en este caso.

La Tabla 3 muestra que el valor promedio estacional de μt para un período de medición de 3 años fue menor en invierno (6.10 m s^{-1}) que en primavera y verano (8.22 y 8.28 m s^{-1} , respectivamente). El promedio anual de μt fue mayor en el 2003 (8.6 m s^{-1}) que en el 2004 (6.9 m s^{-1}) y en el 2005 (7.1 m s^{-1}). Estos resultados indican que las condiciones para que ocurra el proceso de erosión del suelo no fueron las mismas a lo largo del período analizado.

El valor de $\bar{u}(\mu t)$ promedio de tres años varió significativamente entre estaciones del año ($p < 0.05$) siendo mayor en verano (7.67 m s^{-1}) y primavera (7.62 m s^{-1}) que en invierno (5.74 m s^{-1}).

Los valores de μt (26.48 m s^{-1}) y de $\bar{u}(\mu t)$ (22.38 m s^{-1}) para otoño no fueron tenidos en cuenta para realizar esta comparación entre estaciones ya que solo corresponden a una sola tormenta ocurrida en el 2005, datos que fueron definidos a través del análisis del residual estudentizado como puntos outliers ($p < 0.001$).

Los valores de \bar{u} fueron diferentes entre años y estaciones del año ($p < 0.05$). Los años 2003 y 2005 tuvieron mayores valores de \bar{u} (4.26 y 3.84 m s^{-1} , respectivamente) que 2004 (2.31 m s^{-1}). El verano (3.77 m s^{-1}) y la primavera (3.51 m s^{-1}) mostraron valores similares de \bar{u} . Invierno (3.19 m s^{-1}) y primavera tampoco mostraron diferencias entre sí, pero invierno y otoño (2.98

m s⁻¹) presentaron valores menores de \bar{u} que verano. Otoño presentó el valor más bajo de \bar{u} que el resto de las estaciones del año. Estos resultados no se relacionan con los valores de μt , indicando que la velocidad umbral del viento es independiente de la velocidad del viento. Sin embargo, los valores estacionales de μt se relacionaron lineal y significativamente con los valores de $\bar{u}(\mu t)$ ($y=0.8145x + 0.877$, $R^2=0.9981$, $p<0.001$). La relación fue más débil con \bar{u} ($y= 1.2493\ln(x) + 0.957$, $R^2= 0.4487$, $p<0.05$), indicando una dependencia lógica de μt de las variables antes mencionadas.

Las condiciones climáticas no fueron muy diferentes entre otoño e invierno y entre otoño y primavera como con verano, pero, sin embargo, los valores de μt fueron algo diferente entre otoño e invierno. Otoño tuvo mayores precipitaciones (122 mm en el 2003, 184 mm en el 2004 y 143 mm en el 2005) que invierno (36 mm en el 2003, 128 mm en el 2004 y 94 mm en el 2005), mayor humedad relativa en la mayoría de los años (en promedio 70 % en otoño y 67 % en invierno pero similar velocidad media del viento (2.98 m s⁻¹ en otoño y 3.19 m s⁻¹ en invierno).

El cociente entre precipitación media y temperatura media (UNESCO-FAO, 1963) fue, en promedio para los tres años de estudio, 2.9 en otoño y 2.3 en invierno indicando mayor condición de humedad en otoño que en invierno. Estas tendencias se mantuvieron a lo largo de los tres años de estudio, indicando que otoño presenta condiciones ambientales menos propicias para la ocurrencia del proceso de erosión eólica que el resto de las estaciones del año, debido a sus mayores porcentajes de humedad del aire y a sus menores velocidades de viento. Estos resultados concuerdan con los de Ravi *et al.* (2004, 2006) quienes demostraron que el contenido de humedad del suelo

(determinado principalmente por la humedad relativa del aire) explica las variaciones de μt en estudios con túneles de viento.

La cantidad promedio de material erosionado fue mayor en verano (12.88 t ha^{-1}) que en primavera (3.11 t ha^{-1}), invierno (0.17 t ha^{-1}) y otoño donde no hubo erosión. Estos resultados indican que la cantidad de material erosionado no concuerda con los valores de μt , los cuales fueron mayores en primavera y verano que en invierno y otoño. Esto demuestra una falta de correlación entre las condiciones que se necesitan para que ocurra el proceso de erosión eólica y la cantidad de material que efectivamente se erosiona de una superficie. La falta de relación entre cantidad de material erosionado y el valor de μt se evidencia claramente en invierno, donde tanto los valores de μt como la cantidad de material erosionado son bajos, contradiciendo las suposiciones previas de que bajos valores de μt se relacionarían con altas cantidades de material erosionado. Esta aparente contradicción puede ser explicada por la corta duración y menor cantidad de tormentas erosivas, por las bajas velocidades de viento y/o la falta de ráfagas durante las tormentas. De hecho, el invierno presentó tormentas más prolongadas (570 min) que el verano (408 min) y la primavera (143 min) pero la duración de aquellas con velocidades de viento mayores a 7.53 m s^{-1} (valor promedio de μt) fue menor (73 min) que en verano (309 min) y primavera (143 min.). La velocidad promedio del viento durante las tormentas erosivas $\bar{u}(\mu t)$ fue menor en invierno (5.74 m s^{-1}) que en verano (7.67 m s^{-1}) y primavera (7.62 m s^{-1}) ($p > 0.05$). Estos resultados indican que bajas velocidades de viento, con menor cantidad de ráfagas, explican la baja cantidad de material erosionado en invierno a pesar de los bajos valores de velocidad umbral obtenidos en esta estación.

Se puede concluir que la ecuación propuesta por Stout (2004) permite una rápida determinación del valor de μ_t bajo condiciones reales de campo, como un índice de la susceptibilidad del suelo a la erosión eólica. Sin embargo, μ_t fue variable a lo largo de las diferentes estaciones del año y el hecho de usar un único valor μ_t anual en los modelos de predicción de la erosión eólica puede traer aparejados errores en los cálculos de erosión eólica potencial de un lugar. El valor de μ_t que debería usarse, en los modelos de predicción de la erosión eólica, para los suelos de la RSPC es de 7.53 m s^{-1} , el cual resultó ser superior al utilizado por RWEQ (5 m s^{-1}). Utilizar en el modelo RWEQ este valor (5 m s^{-1}) y no el correcto para los suelos de RSPC (7.53 m s^{-1}) puede generar cálculos erróneos de la erosión potencial del lugar, pudiendo sobreestimar la erosión eólica.

La velocidad umbral de viento (μ_t) fue diferente a lo largo de las distintas estaciones de año, estas diferencias en el valor de μ_t estuvieron relacionadas con variaciones de la velocidad del viento, de las precipitaciones, de la temperatura y de la humedad relativa. Estos resultados permiten aceptar la hipótesis 1, indicando estas variaciones que las condiciones para que ocurra el proceso de erosión del suelo no son las mismas a lo largo del año.

De esta manera, los modelos de predicción de erosión eólica deberían considerar en los cálculos de la erosión eólica potencial de un lugar, las variaciones de μ_t a lo largo del año. Utilizar un único valor de μ_t puede sobrestimar o subestimar la erosión potencial de un sitio, sin embargo, a la hora de utilizar un único valor μ_t , este debería corresponder a la zona de estudio y resultar del promedio de las variaciones estacionales, evitando así

generar datos de erosión erróneos.

3.2. Resultados Obtenidos para Validar la Hipótesis 2

Hipótesis 2a

Cantidades o energías similares de lluvia degradarán más la rugosidad superficial de un Ustipsamment que la de un Haplustol.

Hipótesis 2b

La degradación relativa de la rugosidad orientada por efecto de la lluvia será menor para herramientas de labranza que produzcan mayor rugosidad.

Hipótesis 2c

Las ecuaciones propuestas por el modelo RWEQ permitirán evaluar la degradación de la rugosidad no orientada y orientada en los suelos de la RSPC.

La Tabla 4 muestra que la rugosidad no orientada del suelo (Crr) fue afectada de manera diferente por cada herramienta de labranza, en cada suelo ($p < 0.05$). En el Ustipsamment, la sembradora lister (LB) presentó el valor más alto de Crr (1.05 cm), seguido por la sembradora de grano fino (DH) y el arado de rastra (DT) (0.55 y 0.53 cm, respectivamente). En el Haplustol, el valor de Crr fue mayor para DT (1.21 cm) que para DH (0.83 cm) ($p < 0.05$), pero el de LB fue estadísticamente similar a los dos anteriores (0.92 cm). El alto valor de Crr de LB, en el Ustipsamment, pudo deberse a la translocación de pseudo-agregados (“clods”) desde el subsuelo más húmedo hacia la superficie, ya que LB operó a mayor profundidad (25.4 cm) que DT (2,5 cm) y DH (5.1 cm). La formación de estos pseudo-agregados en el subsuelo más húmedo fue descrita por Quiroga *et al.* (1999), particularmente en suelos con bajo

contenido de CO, y por Mendez y Buschiazzo (2008) en suelos de la RSPC. Powers y Skidmore (1984) mostraron que estos pseudo-agregados también se forman por un efecto de compresión de las labranzas, que aglutina a las partículas y crea, de esta manera, *clods* más compactos. En el Haplustol como partimos de un suelo con mayor agregación natural la baja intensidad de laboreo que genera la labranza DT, al operar a menor profundidad, disturbo menos el suelo permitiendo que Crr se mantenga alto. En cambio, con las otras dos labranzas el laboreo más agresivo, debido a su mayor profundidad de trabajo, pudo haber destruido parte de la rugosidad no orientada del suelo disminuyendo el valor de Crr y, en el caso particular de LB, esta destrucción se pudo haber compensado con la mayor formación de pseudo-agregados producto de su mayor profundidad de laboreo (25.4 cm). Estos resultados coinciden con los reportados por Hevia *et al.* (2007) quienes encontraron que la intensidad y tipo de labranza modifica la distribución y cantidad de agregados en el suelo, demostrando que una mayor intensidad de laboreo destruye los agregados gruesos a finos (Tiessen *et al.*, 1983).

Tabla 4. Rugosidad no orientada (Crr) y orientada (Kr) inicial de dos suelos, producida por cada herramienta de labranza.

Tipo de suelo	Labranza	Crr	Kr
Ustipsamment típico	LB	1.05 ^{bc}	25.40 ^a
	DH	0.55 ^a	2.92 ^b
	DT	0.53 ^a	0.85 ^c
Haplustol éntico	LB	0.92 ^{bc}	25.40 ^a
	DH	0.83 ^{ab}	2.92 ^b
	DT	1.21 ^c	0.85 ^c

Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos de labranza y suelos (Tuckey, $p < 0.05$).

La Tabla 5 muestra la tasa de degradación de Crr (RRRm) y Kr (ORRm) creada por las herramientas de labranza en cada suelo a dos tiempos de simulación de lluvia (10 y 40 min). Los resultados indican que en el Haplustol, ORRm fue diferente entre herramientas de labranza después de ambos tiempos de simulación ($p < 0.05$). La menor tasa de degradación se obtuvo en LB, seguido de DH y DT, secuencia de degradación que se mantuvo en ambos tiempos de simulación: en 10 min. 0.98, 0.84 y 0.65 y en 40 min. 0.93, 0.74 y 0.41, respectivamente.

En el Ustipsamment, ORRm sólo fue diferente ($p < 0.05$) entre LB y las otras dos labranzas. Nuevamente, LB tuvo la menor tasa de degradación luego de aplicar los dos tiempos de simulación: 0.87 a 10 min y 0.72 a 40 min, coincidiendo con el valor más alto de Kr inicial, seguido por DH y DT que presentaron similares valores de ORRm luego de 10 min (0.72 y 0.63, respectivamente) y de 40 min (0.49 y 0.43, respectivamente), coincidiendo con los valores más bajos de Kr inicial. En ambos suelos rugosidades orientadas iniciales mayores se degradaron menos. Estos resultados obedecen a la forma de cálculo de ORRm, basada en un cambio relativo con respecto a la rugosidad inicial. De esta manera, cuanto mayor sea el Kr inicial, menor será el cambio relativo ante una variación absoluta similar. Lyles y Tatarko (1987) comprobaron que la altura inicial de los camellones fue la variable más relacionada con el cambio de la rugosidad por efecto de las lluvias.

En el Ustipsamment todas las labranzas se comportaron en forma similar, mostrando mayor degradación ($p < 0.05$) luego de la lluvia más prolongada (40 min). Los valores de ORR para una lluvia de 10 y 40 min de duración fueron: en LB de 0.87 y 0.72, en DH de 0.72 y 0.49 y en DT

Tabla 5. Tasa de degradación de la rugosidad orientada (ORRm) y no orientada (RRRm) de dos suelos, en tres labranzas y luego de dos tiempos de simulación de lluvia.

Tiempo de simulación de lluvia (min)	Labranza	ORRm		RRRm	
		Haplustol éntico	Ustipsamment típico	Haplustol éntico	Ustipsamment típico
10	LB	0.98 ^a	0.87 ^{ab}	0.66 ^{ab}	0.63 ^{abc}
	DH	0.84 ^{bc}	0.72 ^{de}	0.71 ^a	0.52 ^{cd}
	DT	0.65 ^{de}	0.63 ^e	0.55 ^{bcd}	0.53 ^{bcd}
40	LB	0.93 ^{ab}	0.72 ^{de}	0.55 ^{bcd}	0.27 ^g
	DH	0.74 ^{cd}	0.49 ^f	0.43 ^{def}	0.37 ^{efg}
	DT	0.41 ^f	0.43 ^f	0.47 ^{de}	0.31 ^{fg}

Datos con letras similares no son significativamente diferentes (Tukey, $p < 0.05$) entre herramientas de labranza y tipos de suelos dentro de cada tipo de rugosidad. Cada valor es un promedio de 5 réplicas.

de 0.63 y 0.43, respectivamente. Esto se debe a que la agregación natural del suelo es muy baja, entonces la persistencia de los camellones depende, principalmente de los pseudo-agregados, los cuales se desintegran más fácilmente cuando mayor es la duración y la cantidad de lluvia aplicada, principalmente por el impacto de las gotas (Bennet *et al.*, 1951). Según Lyles *et al.* (1969) la persistencia de los *clods* esta en función de su tamaño y densidad definido principalmente por las herramientas de labranza y de la textura del suelo. En cambio, en el Haplustol únicamente DT presentó valores de ORR más bajos ($p < 0.05$) luego de una lluvia de 10 min. (0.65) que de 40 min. (0.41), respecto a las otras dos labranzas (DH y LB). Esto se debe a que la mejor agregación natural que presenta el suelo determina que la degradación relativa de K_r , ante una variación absoluta similar, esté en función de la altura inicial del camellón y no de la cantidad de lluvia. De esta manera una determinada cantidad de lluvia va a afectar relativamente más a los camellones de menor altura que a los de mayor altura.

La tasa de degradación de K_r (ORRm) fue mayor en el Ustipsamment que en el Haplustol ($p < 0.05$) para LB y DH, luego de una simulación de lluvia de 40 min, y sólo en DH luego de una simulación de 10 min. Estas diferencias pueden ser atribuidas a la menor agregación del Ustipsamment con respecto al Haplustol, debido a su mayor contenido de arena y menor de arcilla. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Steichen (1984) y Zobeck y Onstand (1987), quienes demostraron que la tasa de degradación de la rugosidad de la superficie del suelo es menor en suelos más evolucionados, con mayor desarrollo de su estructura.

Los resultados presentados hasta acá, indican que ORRm no sólo

depende de la herramienta de labranza utilizada sino también del tipo de suelo, de la cantidad de lluvia aplicada y de sus interacciones, en acuerdo con lo descrito por Lyles y Tatarko (1987) y Zobeck y Popham (2001). En el Haplustol el mayor grado de estructuración del suelo permitió que la tasa de degradación de Kr (ORRm) sea un parámetro relativo en función del valor de Kr inicial (definido principalmente por la altura del camellón). En cambio en el Ustipsamment el menor grado de desarrollo del suelo llevó a que ORR no dependa tanto del Kr inicial, volviéndose más susceptibles a factores extrínsecos al suelo como son las lluvia y la formación de *clods* producto de las labranzas. Estos últimos autores concluyeron que el 82 % de la variación de la altura de los camellones después de una simulación de lluvia depende del valor de rugosidad inicial, definido por el tipo de suelo, la herramienta de labranza utilizada y la cantidad de lluvia simulada.

La tasa de degradación de la rugosidad no orientada (RRRm) no presentó diferencias ($p < 0.05$) entre herramientas de labranzas luego de los dos tiempos de simulación de lluvia, en ambos suelos. La excepción fue DT (0.55) que tuvo un cambio mayor que DH (0.71) luego de 10 min de simulación de lluvia en el Haplustol ($p < 0.05$, Tabla 5). Estos resultados sugieren que RRRm no depende del tipo de herramienta de labranza utilizada, sino de propiedades intrínsecas del suelo. Resultados que no coinciden con los obtenidos por Zobeck y Onstad (1987) y Zobeck y Popham (2001), quienes comprobaron que las herramientas de labranza, al igual que las propiedades del suelo, tienen un significativo efecto sobre la tasa de degradación de Crr. Esta contradicción puede ser explicada, como se mencionara anteriormente, por la formación de pseudo-agregados o *clods* en la superficie de los suelos, al removerse el

subsuelo húmedo durante el laboreo. Otro factor que pudo haber producido esta tendencia es el uso del método de la cadena para medir Crr, realizado en forma paralela a los camellones. Los autores antes mencionados utilizaron el perfilómetro de agujas (Kuipers, 1957, Potter *et al.*, 1990) y si bien los dos son métodos de contacto, éste último es menos destructivo sobre la superficie del suelo, principalmente sobre los *clods* que son más sensibles, además permite realizar una descripción más exacta del perfil rugoso de la superficie del suelo y, generalmente, suele ir acompañado de un escaneo fotográfico que permite digitalizar la posición de los puntos de contacto (García Moreno *et al.*, 2008).

RRRm fue mayor luego de aplicar una lluvia de 40 min que de 10 min en todos los tratamientos de labranza en el Ustipsamment ($p < 0.05$). No sucedió lo mismo en el Haplustol, donde únicamente DH tuvo una tasa de degradación mayor ($p < 0.05$) luego de una lluvia de 40 min (0.41) que de 10 min (0.73), mientras que las otras labranzas presentaron similares RRRm. Esto indica que la cantidad de agua aportada por la lluvia de mayor duración tuvo mayor efecto degradante sobre los agregados y *clods* en el suelo menos estructurado y de textura más gruesa (Ustipsamment), que en el suelo de mejor estructuración y mayor estabilidad de agregados, confirmando la importancia de algunas propiedades del suelo, entre ellas la textura, y de la cantidad de lluvia, para definir RRRm. Tales resultados coinciden con los informados por otros autores (Johnson *et al.*, 1979; Steichen, 1984; Zobeck y Onstad, 1987), quienes encontraron que diferentes suelos sufren degradaciones diferentes de Crr, dado que diferencias en el tipo de suelo producen distinto grado de agregación del suelo y diferente estabilidad y cantidad de agregados. La mayoría de estos autores utilizaron suelos con mayores contenidos de limo y arcilla que los

analizados en este estudio, lo que sería la causa de las diferencias encontradas.

Las diferencias de RRRm entre suelos fueron significativas en LB y DT (luego de 40 min de lluvia) y en DH (luego de 10 min de lluvia) (Tabla 5). Estos resultados, pudieron estar afectados por el tipo de metodología utilizada para simular las labranzas, influyendo el laboreo manual en la destrucción de los agregados naturales del suelo y en la formación de pseudo-agregados, enmascarando el efecto propio del suelo, definido principalmente por su textura y grado de estructuración. Además, existió una interacción muy fuerte de los tres factores analizados: tipo de suelo, herramientas de labranza y cantidad de lluvia ($p < 0.001$) que genera un efecto combinado, diferente, al que puede tener cada factor por separado, pudiendo enmascarar el importante efecto del tipo de suelo sobre RRRm (Zobeck y Onstad, 1987).

La degradación de ambos tipos de rugosidades es calculada, en los modelos de predicción de erosión eólica, a través de la energía y de la cantidad de lluvia (Saleh, 1997). Otros autores sólo han propuesto el uso de la cantidad de lluvia como único parámetro (Zobeck y Onstad, 1987; van Donk y Skidmore, 2003). La Figura 16 muestra la relación lineal negativa existente entre los cambios de ambas rugosidades, ORRm y RRRm, y la cantidad de lluvia acumulada (CUMR). Incrementos de CUMR produjeron, por ende, mayores tasas de degradación de K_r y C_{rr} . Las ecuaciones que describen estas relaciones son diferentes a las propuestas por la RWEQ (Ec. [4] y [5]), y por la mayoría de los autores que han descripto la relación entre degradación de la rugosidad y CUMR (Onstad *et al.*, 1984; Römken y Wang, 1985; Potter *et al.*, 1990; Saleh, 1998). Estos autores comprobaron que los mejores ajustes fueron

de tipo exponencial negativo pero, debe tenerse en cuenta que ellos no consideraron en sus ecuaciones el valor de K_r inicial producto de cada labranza. Potter *et al.* (1990) utilizó una función exponencial para predecir la degradación de C_{rr} en función de las lluvias acumuladas y relacionó la estabilidad de los agregados con el contenido de CO y arcilla, extendiendo la misma explicación para la degradación de los camellones.

La lluvia acumulada causó la degradación de C_{rr} y K_r a diferentes tasas (Fig. 16). En primer lugar, ORR_m fue diferente para cada herramienta de labranza y tipo de suelo, mientras que RRR_m fue independiente de las labranzas y sólo varió según el tipo de suelo. En el Haplustol, la pendiente de la ecuación de regresión fue mayor en DT (-0.014) que en los otros dos sistemas. Estos resultados indican que incrementos de CUMR, produjeron menor degradación de K_r en LB y DH que en DT y significa que los camellones que tuvieron mayor altura inicial fueron más resistentes. Estos resultados coinciden con los anteriormente discutidos y con los informados por Lyles y Tatarko (1987) quienes asumieron que el efecto de CUMR sobre la persistencia de los camellones depende de la altura inicial de los mismos. Zobeck y Popham (2001), también relacionaron la tasa de degradación con la altura inicial de los camellones. En el Ustipsamment, la pendiente de la ecuación fue ligeramente superior en DH y DT (-0.012 y -0.010, respectivamente) respecto de LB (-0.007). Estos resultados indican que incrementos de CUMR causan menor degradación de K_r en LB que en DT y DH y señalan, al igual que en el Haplustol, que los camellones de mayor altura fueron un poco más resistentes a las lluvias. Sin embargo, la labranza DH tuvo un comportamiento diferente en ambos suelos. En el Haplustol, la tasa de degradación de K_r fue baja, más

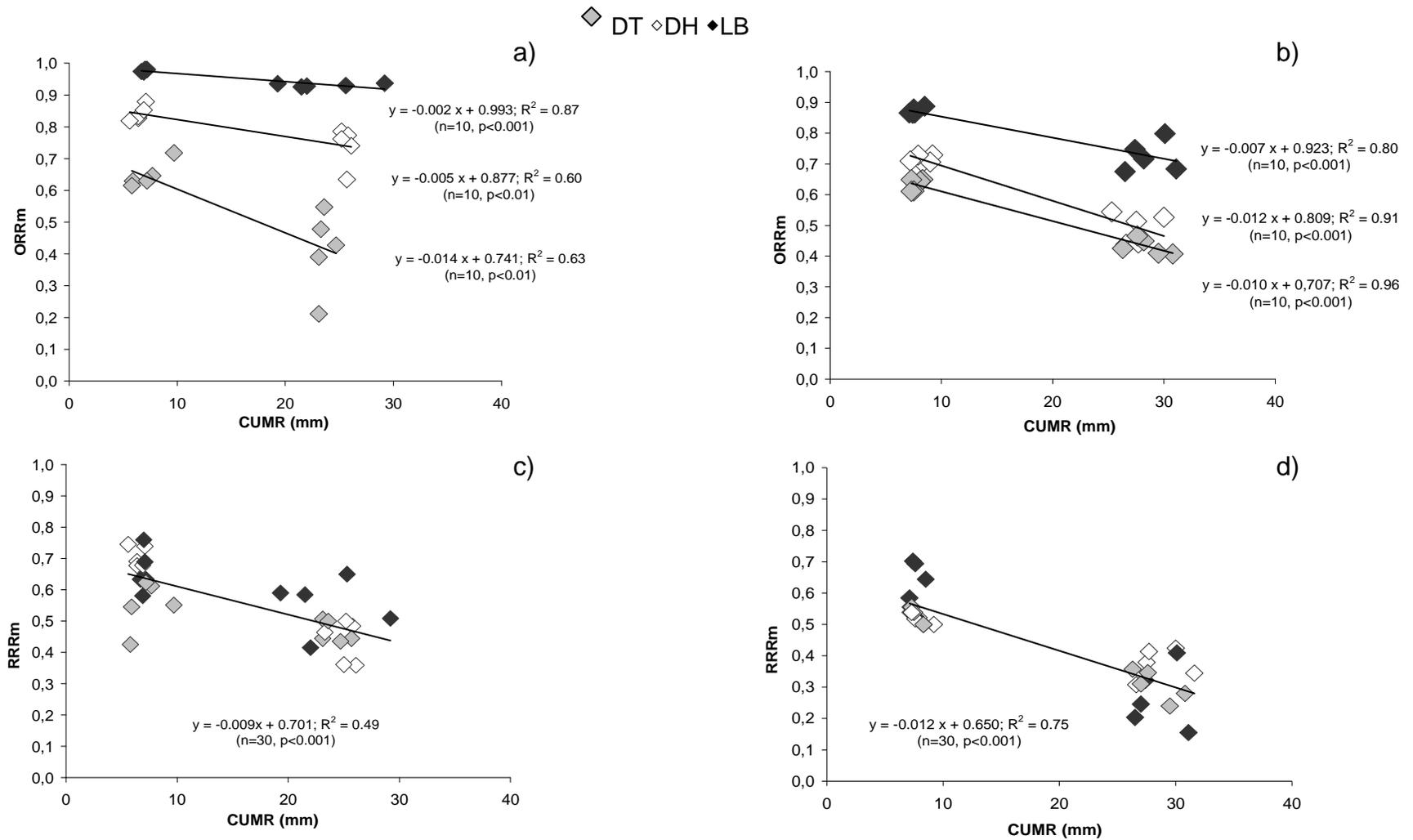


Figura 16. Degradación de la rugosidad orientada (ORRm) en a) el Haplustol, b) el Ustipsamment, y de la rugosidad no orientada (RRRm) en c) el Haplustol y d) el Ustipsamment, producidas por tres herramientas de labranza en función de la cantidad de lluvia (CUMR).

parecida a la tasa de LB (camellones más altos), mientras que en el Ustipsamment fue alta y más parecida a la de DT (camellones más bajos). Estos resultados pueden estar relacionados con las propiedades intrínsecas de ambos suelos. Como se ha mencionado anteriormente, la mejor estructuración del Haplustol, sumado a su textura con menor tenor de arena permite no sólo una mejor agregación natural sino también la formación de *clods* más estables frente a las lluvias otorgando mayor resistencia a los camellones y por ende disminuyendo ORRm. En cambio, en el Ustipsamment, la agregación natural y formación de *clods* es más baja, determinando que los camellones sean menos resistentes frente a una lluvia, aumentando así su degradación.

En términos generales, la tasa de degradación de Kr fue mayor en el Ustipsamment que en el Haplustol, indicando estos resultados que los camellones son más degradables por las lluvias en el suelo arenoso franco que en el franco arenoso. Nuevamente, las diferencias entre suelos deben atribuirse a sus texturas y a su capacidad para formar agregados y pseudo agregados más o menos estables.

La variación de RRRm en función de las lluvias resulto ser independiente de las herramientas de labranza en ambos suelos. El mejor ajuste entre RRRm y CUMR fue lineal negativo y existió para todas las herramientas de labranza analizadas en forma conjunta. Estos resultados indican que la degradación de Crr fue más influenciada por el tipo de suelo que por la herramienta de labranza, lo que no coincide con lo reportado por Zobeck y Onstad (1987) y Zobeck y Popham (2001) quienes encontraron un fuerte efecto de las herramientas de labranza y de CUMR sobre la degradación de Crr. Zobeck y Popham (2001) señalan que RRR depende de la rugosidad inicial y que, en

general, la tasa de cambio de la degradación de Crr aumenta con incrementos de la rugosidad inicial. Tampoco los resultados obtenidos coinciden con los hallados por Saleh (1998), quien encontró diferentes tasas de degradación según el tamaño de los agregados definido por las herramientas de labranza. La discrepancia de nuestros resultados respecto de los reportados en la bibliografía citada puede deberse, principalmente, a la diferencias entre los suelos estudiados. La mayoría de los suelos analizados en los trabajos mencionados presentan texturas limo-arcillosa y franco limosa, generalmente con altos contenidos de MO. Esto nos induce a pensar que los pseudo-agregados producto de las distintas labranzas tuvieron diferentes resistencia respecto a los suelos considerados en nuestro estudio.

La pendiente de la ecuación que ajustó las relaciones entre RRRm y CUMR fue ligeramente mayor para el Ustipsamment (-0.012) que para el Haplustol (-0.009), indicando que las lluvias degradan más los agregados del suelo arenoso franco que los del franco arenoso. Estos resultados concuerdan con los de Potter *et al.* (1990), Zobeck y Onstad (1987), Saleh (1998) y Zobeck y Popham (2001) que destacan el efecto de la textura sobre la estabilidad de los agregados del suelo.

Según estos resultados, la cantidad de lluvia acumulada es un buen parámetro para predecir la degradación de ambos tipos de rugosidades. Sin embargo, la predicción de la degradación de la rugosidad orientada debería contemplar algún parámetro complementario para las labranzas.

La Figura 17 muestra la relación que existe entre la degradación de Kr y Crr y la energía de las lluvias (CUMEI). Este tipo de relación es la utilizada para explicar la variación de la degradación de ambos tipos de rugosidades por los

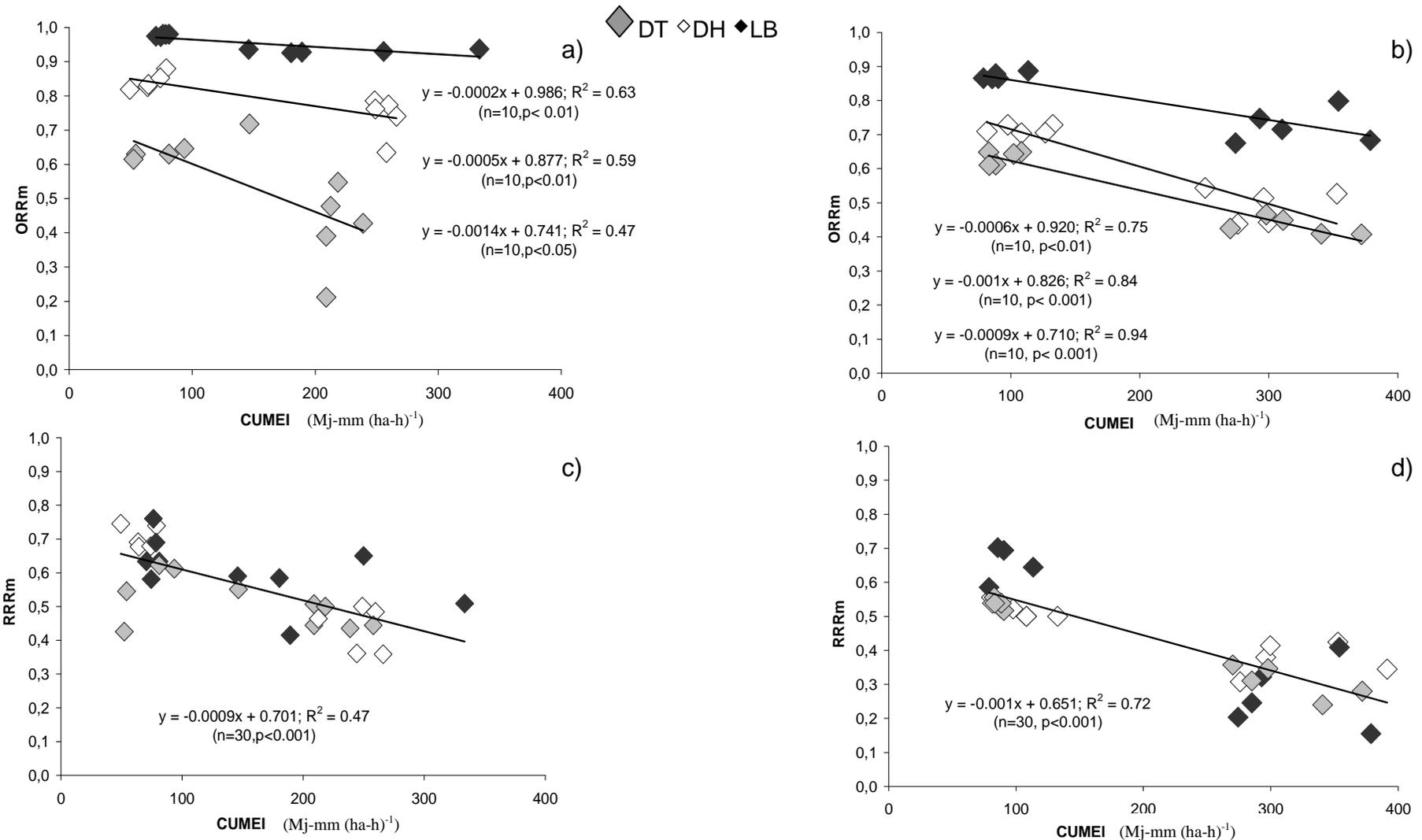


Figura 17. Degradación de la rugosidad orientada (ORRm) en a) el Haplustol, b) el Ustipsamment, y de la rugosidad no orientada (RRRm) en c) el Haplustol y d) el Ustipsamment, producidas por tres herramientas de labranza en función de la energía de lluvia (CUMEI).

modelos predictivos de erosión, como WEQ y RWEQ. El mejor ajuste, para los dos suelos y las tres herramientas de labranza, fue lineal negativo. La disminución de la rugosidad del suelo con el incremento de la energía de la lluvia ha sido mencionada por numerosos autores (Zobeck y Onstad, 1987; Bertuzzi *et al.*, 1990; Borselli, 1999; Martinez-Mena *et al.*, 2001). Sin embargo las formas de las curvas no coinciden con las propuestas por la RWEQ (Ec. [4] y [5]) ni con las citadas por la bibliografía, que son cuadráticas (Eltz y Norton, 1997) o exponenciales, ambas negativas (Burwell y Larson, 1969; Dexter, 1977; Onstad, 1984; Saleh, 1998). Estas diferencias en las curvas pueden estar relacionadas con las mayores energías de lluvias simuladas, en relación a las utilizadas en nuestro estudio. Además en la mayoría de los casos los suelos fueron de texturas más finas (franco arcillosos en general) que las de los dos suelos aquí analizados.

ORRm en función del CUMEI fue diferente para cada herramienta de labranza y tipo de suelo, mientras que RRRm fue independiente de las labranzas y sólo varió según el tipo de suelo, es decir tuvo un comportamiento similar al CUMR. En el Haplustol la pendiente de la regresión fue mayor en DT (-0.0014) que en DH (-0.0005) y LB (-0.0002), resultados que estarían indicando que incrementos en la energía de la lluvia producen mayor degradación en DT que en las otras dos labranzas, significando que los camellones de mayor altura nuevamente son más resistentes, coincidiendo con los resultados de Lyles y Tatarko (1987). En el Ustipsamment la pendiente de la regresión fue superior en DH y DT (-0.001 y -0.0009) que en LB (-0.0006), es decir que nuevamente el camellón de mayor altura fue más resistente a las lluvias. La labranza DH tuvo un similar comportamiento en los

dos suelos que con la variable CUMR, por lo que merece la misma explicación dada anteriormente.

En general, la tasa de degradación de K_r en función de CUMEI fue mayor para el Ustipsamment que para el Haplustol, indicando que los camellones son más degradables, ante las diferentes energías de lluvias, en el suelo arenoso franco que en el franco arenoso. Como se discutió anteriormente, las diferencias entre suelos deben atribuirse a sus texturas y a su capacidad para formar pseudo agregados más o menos estables.

La pendiente de la ecuación que explicó la relación entre RRRm y CUMEI fue ligeramente mayor en el Ustipsamment (-0.0011) que en el Haplustol (-0.0009), indicando mayores cambios en la rugosidad no orientada en el suelo más arenoso, lo que debe atribuirse a la menor estabilidad de sus agregados. Autores como Dexter (1977), Lyles y Tatarko (1987) y Zobeck y Onstad (1987) también relacionaron la degradación de la rugosidad no orientada del suelo creada por diferentes herramientas con la energía de la lluvia y atribuyeron gran parte de esta variación a la textura de los suelos.

En general, las ecuaciones de regresión utilizadas para relacionar CUMEI y CUMR con la degradación de ambas rugosidades (RRRm y ORRm) tuvieron un coeficiente de determinación (R^2) más alto en el Ustipsamment que en el Haplustol. Esto refleja que los cambios de ambas rugosidades con el incremento del CUMEI o CUMR presentaron menor dispersión en el suelo más arenoso, quizás porque el Ustipsamment fue más sensible a pequeños cambios en la energía y en la cantidad de la lluvia, como producto de la mayor labilidad de sus agregados, definidas principalmente por su textura y estructura.

La variable CUMR presentó valores de R^2 más altos que CUMEI en

todos los casos (Fig. 16 y 17). Se puede deducir que la cantidad de lluvia (CUMR) es el parámetro más adecuado para ser usado en los modelos de degradación de la rugosidad orientada y no orientada del suelo, dentro de los modelos de predicción de la erosión eólica debido, no sólo, al buen ajuste que presentaron sus ecuaciones sino a que es un dato mucho más accesible de obtener a campo, en relación con la energía de la lluvia. Estos resultados concuerdan con los encontrados por otros autores (Cogo *et al.*, 1984; Lyles y Tatarko, 1987; Zobeck y Onstad, 1987; Zobeck y Popham, 2001) que sugieren que el modelo más sencillo para evaluar la degradación de la rugosidad es aquel que utiliza como parámetro la cantidad de lluvia, debido a su determinación más simple que la energía de la lluvia. Algunos autores, sin embargo, resaltan la mayor sensibilidad de CUMEI que de CUMR (Mannering *et al.*, 1966; Dexter, 1977; Steichen, 1984).

La Figura 18 y 19 muestran la relación entre la tasa de degradación de la rugosidad calculada con las ecuaciones del modelo RWEQ (Ec. [4] y [5]) y las medidas a campo. Esta relación representa la confiabilidad de las ecuaciones utilizadas por el modelo para predecir ORR y RRR en los suelos estudiados.

Los resultados muestran que los valores calculados de ORR y RRR (ORRc y RRRc) fueron menores que los medidos a campo (ORRm y RRRm) en ambos suelos. Esto indica que las ecuaciones propuestas por el modelo subestiman la degradación de K_r y C_{rr} para los suelos estudiados. Sólo en el caso de LB, y en el Haplustol, se observó que el modelo, en promedio, sobrestimó un 5% ORRm para ambas cantidades de lluvias (Fig. 18a).

La subestimación del valor de ORRm (Fig. 18) fue del 30 al 50% para DT, seguido por DH con un 10-43%, en ambos suelos y por último LB

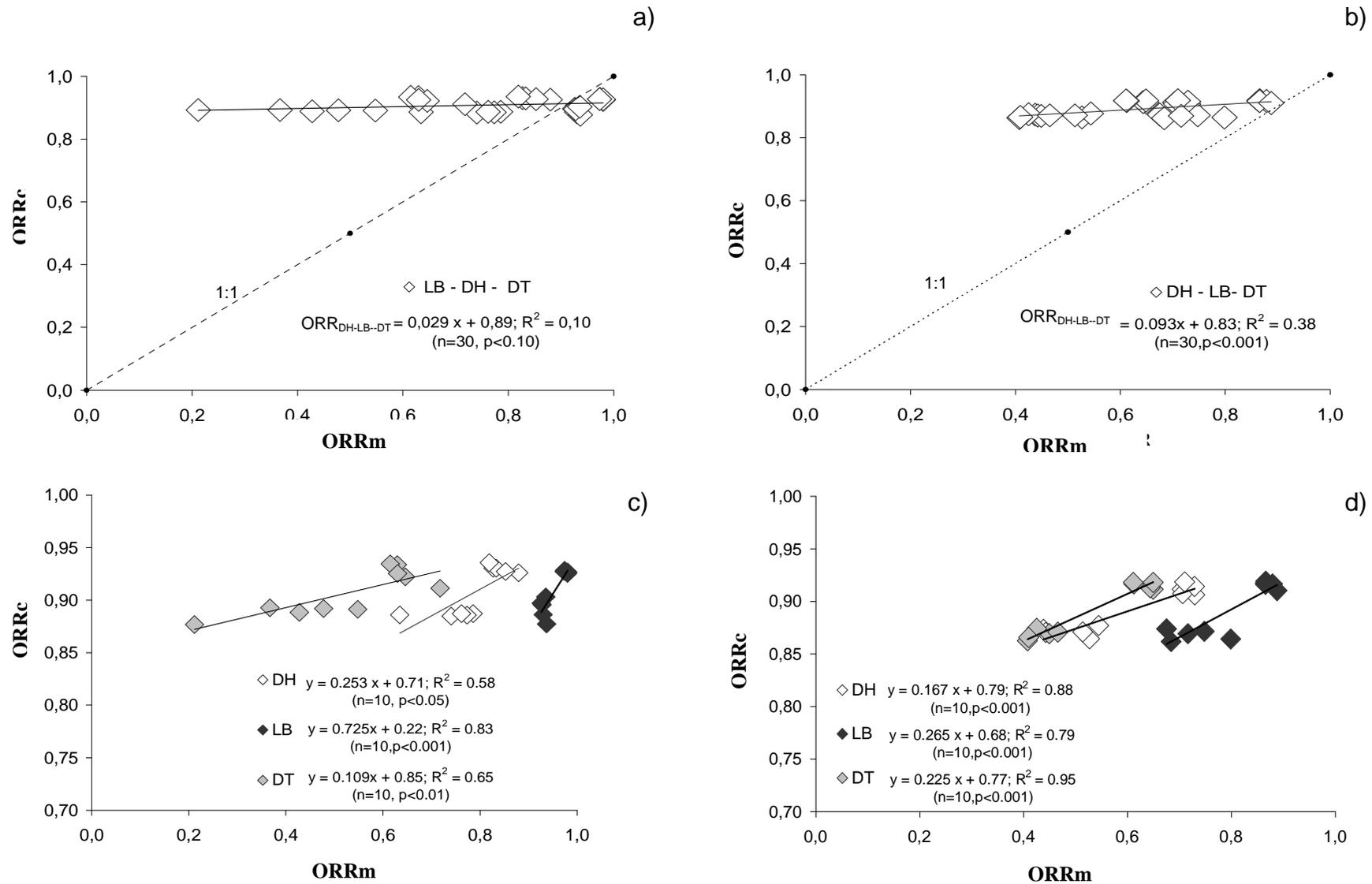


Figura 18: Relación entre el cambio de la rugosidad orientada (ORR) calculado con las ecuaciones del modelo RWEQ y el ORR. medido a campo en condiciones controladas, en forma: a) sin diferenciar por labranzas en el Haplustol, b) sin diferenciar por labranzas en el Ustipsamment, c) en forma individual por labranza en el Haplustol y d) en forma individual por labranza en el Ustipsamment.

con el menor porcentaje de subestimación, entre 4 y 17%, sólo en el Ustipsamment (Fig. 18). Estos resultados demuestran que, cuando mayor es el valor de K_r , más exacta es la estimación del modelo. La incorporación al modelo de algún valor o parámetro que represente el K_r inicial mejoraría las estimaciones. Zobeck y Onstad (1987) y Lyles y Tatarko (1987) también han sugerido que los modelos que se desarrollen para predecir la degradación de la rugosidad deberán diferenciarse por herramienta de labranza, pero deberían incluir a la altura inicial del camellón como otra variable.

La pendiente de la ecuación de regresión lineal que relaciona ORR_m y ORR_c de todas las labranzas en conjunto ($ORR_{DH-DT-LB}$) fue ligeramente mayor en el Ustipsamment (0.093) que en el Haplustol (0.029). La pendiente del Ustipsamment fue un 90% menor que la pendiente correspondiente a la ecuación del modelo (1:1), aunque su ajuste resultó altamente significativo. No sucedió lo mismo para el Haplustol, en el cual la regresión ajustada resultó no significativa a un nivel del 5% para todas las labranzas consideradas en forma conjunta.

Los ajustes de las ecuaciones que explican las relaciones entre ORR_c y ORR_m también resultaron altamente significativas en ambos suelos cuando se analizaron las herramientas de labranza por separado (ORR_{DT} , ORR_{DH} , ORR_{LB}). Esto sugiere que cada labranza posee efectos específicos sobre la degradación de K_r , dependiendo del suelo. Esto coincide con lo encontrado por Lyles y Tatarko (1987), quienes demostraron que el efecto de la lluvia acumulada sobre la persistencia de los camellones es función de la altura inicial de los camellones y del tipo de labranza.

La rugosidad no orientada (Figura 19) presentó valores calculados con el

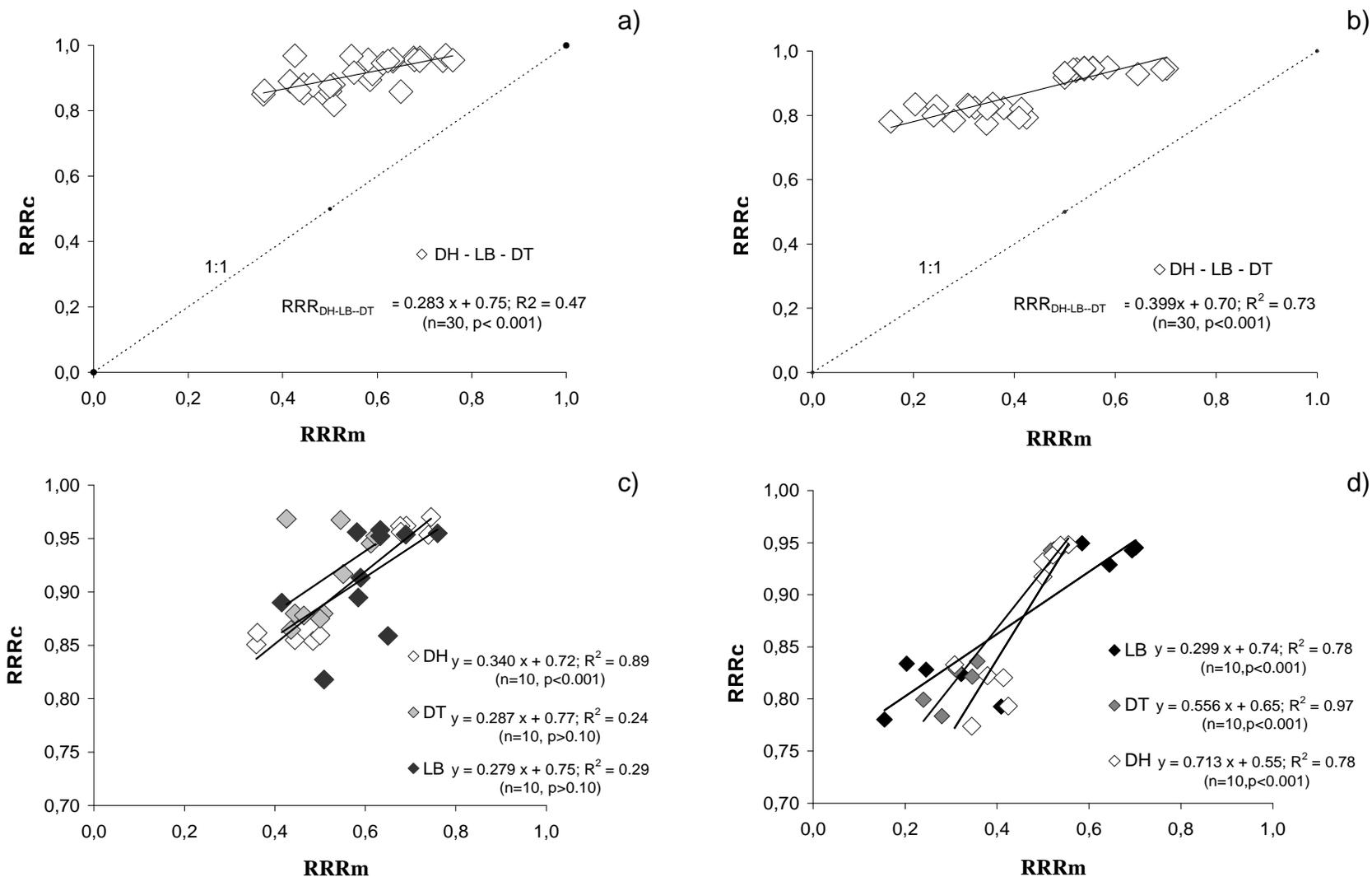


Figura 19. Relación entre el cambio de la rugosidad no orientada (RRR) calculado con las ecuaciones del modelo RWEQ y el RRR. medido a campo en condiciones controladas, en forma: a) sin diferenciar por labranzas en el Haplustol, b) sin diferenciar por labranzas en el Ustipsamment, c) en forma individual por labranza en el Haplustol y d) en forma individual por labranza en el Ustipsamment.

modelo (RRRc) menores a los medidos a campo (RRRm) en ambos suelos, indicando que la ecuación del modelo subestimó la tasa de degradación. La subestimación del modelo varió entre un 30 y 70%, siendo mayor en el Ustipsamment (promedio 51%) que en el Haplustol (promedio 39%), resultados que reflejan que cuando menor fue la degradación, más aproximada fue la estimación del modelo.

La pendiente de la ecuación lineal que ajusta las rugosidades no orientadas fue menor en el Haplustol (0.283) que en el Ustipsamment (0.399), representando, en el primer caso, el 29% de la pendiente del modelo (1:1) contra el 40 % del Ustipsamment. Estos resultados, confirman que el Ustipsamment es el suelo que sufrió mayor degradación luego de una lluvia.

La regresión lineal entre RRRc y RRRm para cada herramienta de labranza fue significativa sólo para DH en el Haplustol y en todos los casos en el Ustipsamment ($p < 0.05$). Las rectas de regresión de RRRc y RRRm para cada labranza se cruzaron entre sí, es decir, que cada labranza no tuvo un patrón de degradación propio, sino que los datos formaron más un conjunto independiente de las labranzas, pero sí afectado por el tipo de suelo.

La ecuación obtenida para todas las labranzas analizadas en conjunto, fue la más apropiada para expresar el valor de RRRm en ambos suelos: en el Haplustol ($RRR_{DH-LB-DT} = 0.283x + 0.75$, $R^2 = 0.27$, $p < 0.001$) y en el Ustipsamment ($RRR_{DH-LB-DT} = 0.399x + 0.70$, $R^2 = 0.73$, $p < 0.001$).

Los resultados obtenidos permiten deducir que las ecuaciones de degradación de Crr y Kr que se utilicen en el modelo para predecir la erosión eólica, deberán incluir el valor de rugosidad inicial o altura del camellón en el caso de ORR y la textura del suelo tanto en el caso de ORR como en RRR.

Debido a la forma de cálculo de ORR, basada en un cambio relativo con respecto a su rugosidad inicial es que se realizó el siguiente análisis. La Figura 20 muestra la relación existente entre la variación relativa de Kr (D, %) y el valor de Kr inicial para ambos suelos y cantidades de lluvia. La ecuación que mejor explicó esta relación fue la de tipo potencial negativa, lo que indica que el porcentaje de degradación es más importante para valores de Kr inicial pequeños y para valores altos de cantidad de lluvia.

La degradación relativa de Kr fue superior en el Haplustol que en el Ustipsamment, lo que se evidencia en la mayor pendiente del primero (0.72) que del último (0.27), principalmente, para valores pequeños de Kr inicial. Para valores altos de Kr, la pendiente se hizo más asintótica al eje x, indicando menor porcentaje de degradación (D), alcanzando ambas curvas un punto donde un aumento del valor inicial de Kr produce un cambio despreciable en el valor de D.

Las ecuaciones que ajustaron a los datos de ambos suelos fueron altamente significativas ($p < 0.001$), sin embargo el Haplustol presentó un valor de R^2 mayor (0.86) respecto al del Ustipsamment (0.58). Además, el buen ajuste de las ecuaciones permite confirmar la buena relación que existe entre la variación relativa de ORR, Kr inicial (definido principalmente por la altura del camellón) y la cantidad de lluvia (CUMR), resultados que coinciden con los de Zobeck y Popham (2001) que encontraron una buena correlación entre la altura inicial del camellón, la proporción de rugosidad y CUMR.

Se conoce poco sobre la variación relativa de ORR de diferentes herramientas de labranza, las cuales quedan definidas, principalmente, por el valor de Kr inicial, y éste último, principalmente, por la altura del camellón.

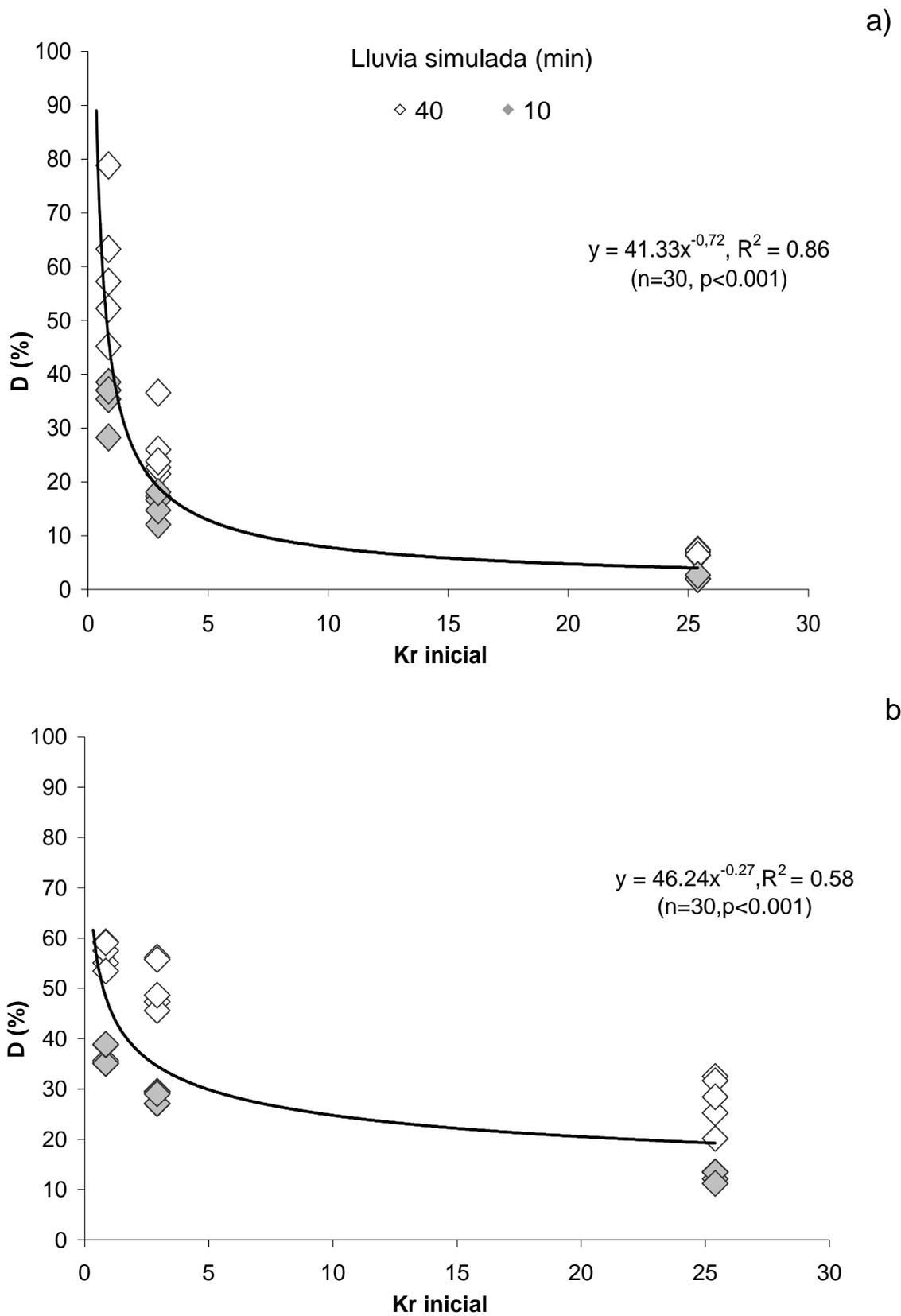


Figura 20. Tasa de degradación relativa de la rugosidad orientada (D) luego de una simulación de lluvia en función de su valor inicial en a) el Haplustol éntico, y b) el Ustipsamment típico.

Existen algunos estudios que reportan efectos de la precipitación sobre la tasa de degradación de camellones de pequeña altura generados por una sola labranza. Esos resultados coinciden con los aquí encontrados, en cuanto a que la degradación de K_r es definida, especialmente, por la disminución de la altura de los camellones (Lyles y Tatarko, 1987). Otros autores señalan que el mejor modelo para predecir los efectos de la precipitación y de las herramientas de labranza sobre la degradación de la rugosidad del suelo es aquel que incluye cierta información sobre el valor de rugosidad inicial y el valor de lluvia acumulada pero únicamente hacen referencia a la rugosidad no orientada del suelo (Zobeck y Popham, 2001).

Los resultados aquí obtenidos aportan cierta novedad al respecto, ya que conociendo el valor inicial de K_r es posible predecir la degradación relativa de K_r por efecto de las lluvias. Sin embargo, las ecuaciones encontradas corresponden a dos suelos únicamente y a un rango de altura de camellón de 0 a 26 cm, por lo que dichas ecuaciones deberían aplicarse a condiciones similares.

La degradación relativa de C_{rr} no mostró el mismo comportamiento que la de K_r . La Figura 21 muestra que la variación relativa de C_{rr} no depende de las herramientas de labranza utilizadas, sino del tipo de suelo.

En el Haplustol, mejor estructurado, se observa que existió una relación potencial positiva entre % de degradación (D) y el valor de C_{rr} inicial. Es decir que valores iniciales altos de C_{rr} indican mayor % de degradación. Esto no coincide con los resultados encontrados por Eltz y Norton (1997) quienes comprobaron que una superficie rugosa pasa a lisa con el incremento de las precipitaciones; pero sí coincide con los resultados de Zobeck y Popham

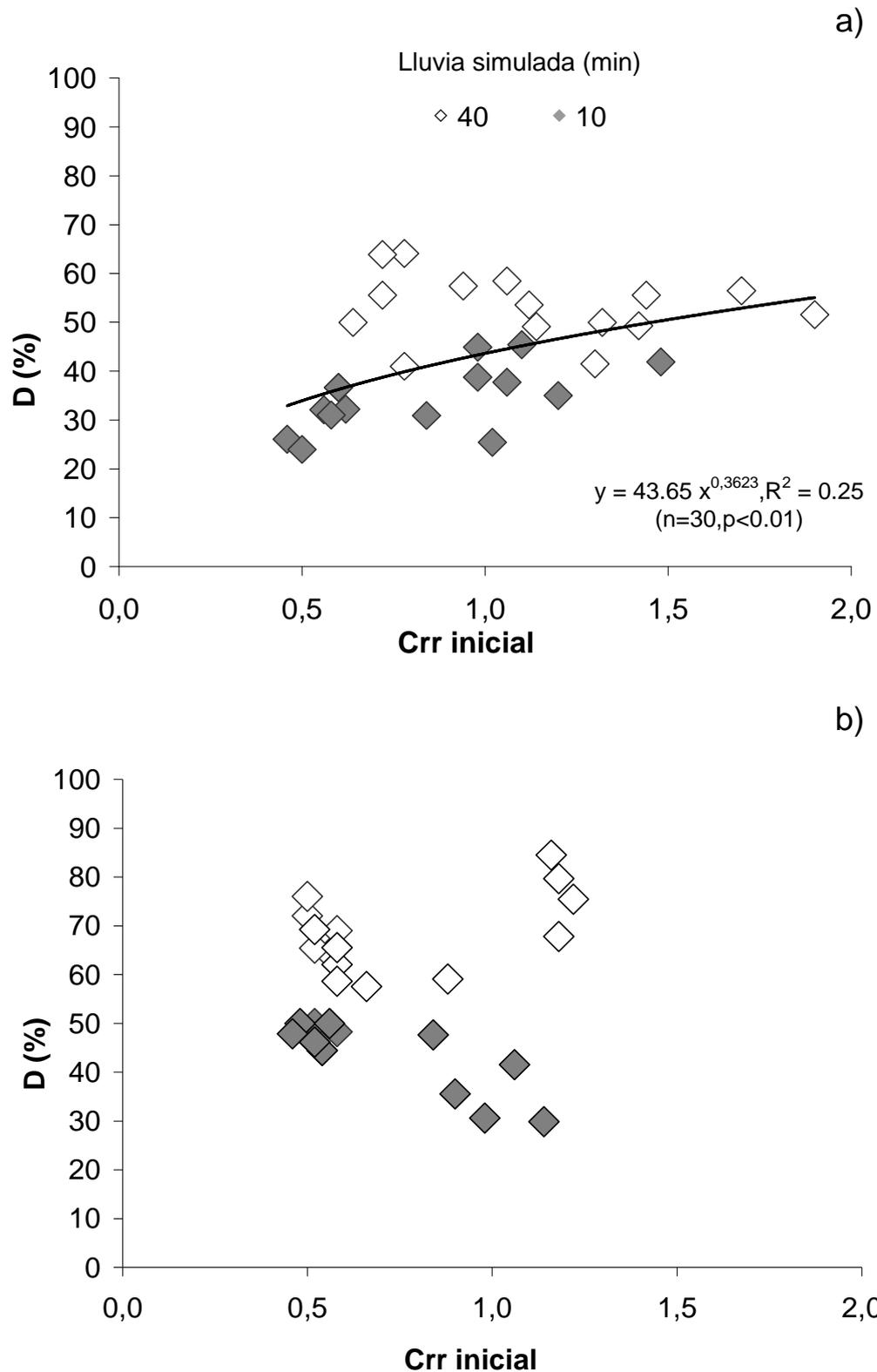


Figura 21. Tasa de degradación relativa de la rugosidad no orientada (D) luego de una simulación de lluvia en función de su valor inicial en a) el Haplustol éntico, y b) el Ustipsamment típico.

(2001) quienes encontraron que la tasa de degradación de la rugosidad no orientada aumenta con incrementos del valor de rugosidad inicial y que este aumento de Crr con la precipitación acumulada podría explicarse por la erosión del agua que provoca la disección de la superficie relativamente lisa, pero el proceso que describieron estos autores no ocurrió en nuestro estudio.

El aumento de Crr en nuestro trabajo se debió a la buena agregación natural que existe en el Haplustol sumada a la formación de *clods* producto de las labranzas que operan a mayor profundidad. Sin embargo, debido a la mayor labilidad de los *clods* frente a las lluvias se produjo un incremento de la tasa de degradación relativa (D).

No sucedió lo mismo en el Ustipsamment, donde ningún ajuste fue posible para el conjunto de datos. Valores iniciales altos de Crr no necesariamente indican menor % de degradación. Esto coincide con los resultados presentados hasta el momento, donde las propiedades del Ustipsamment (menor agregación y grado de estructuración), llevan a que la tasa relativa de RRR no dependa del valor inicial de Crr, sino que esté más relacionada con la cantidad de agua y tipo de suelo, principalmente. Esto coincide con lo encontrado por Zobeck y Onstad (1987) y Eltz y Norton (1997), que señalan que la rugosidad no orientada disminuye con el incremento de lluvias pasando de rugosa a lisa, y dicha tasa de degradación depende del tipo del suelo.

Crr y Kr tuvieron diferentes tasas de degradación dependiendo del tipo de suelo, las herramientas de labranza y los tiempos de simulación de las lluvias. La tasa de degradación de Kr (ORRm) fue mayor en el Ustipsamment que en el Haplustol ($p < 0.05$, Tabla 5) para LB y DH, luego de una simulación de lluvia de

40 min, y sólo para DH luego de una simulación de 10 min. Mientras que RRRm fue mayor en el Ustipsamment que en el Haplustol en LB y DT luego de 40 min de lluvia, y en DH luego de 10 min de lluvia. Estos resultados indican que el agua aportada por la lluvia tuvo mayor efecto degradante sobre los agregados, *clods* y camellones del suelo menos estructurado y de textura más gruesa (Ustipsamment), que en el suelo mejor estructurado, con agregados más estables. Sin embargo existieron condiciones de rugosidad no orientada y orientada donde la degradación fue similar entre suelos. Estos resultados pudieron estar afectados por el tipo de metodología utilizada para simular las labranzas, influyendo el laboreo manual en la destrucción de los agregados naturales del suelo y en la formación de pseudo-agregados, enmascarando el efecto propio del suelo, definido principalmente por su textura y grado de estructuración. Además, en ambas rugosidades (C_{rr} y K_r) existió una interacción muy fuerte de los tres factores analizados: tipo de suelo, herramientas de labranza y cantidad de lluvia ($p < 0.001$) que genera un efecto combinado, diferente, al que puede tener cada factor por separado, pudiendo enmascarar el importante efecto del tipo de suelo sobre RRRm y ORR. Estos resultados nos llevan a aceptar parcialmente la hipótesis 2a.

Tanto en el Haplustol como en el Ustipsamment valores iniciales altos de rugosidad orientada (K_r) se degradaron menos. Estos resultados se han debido a la forma de cálculo de ORRm, basada en un cambio relativo con respecto a la rugosidad inicial. De esta manera, cuanto mayor sea el K_r inicial, menor será el cambio relativo ante una variación absoluta similar. Estos resultados permiten aceptar la hipótesis 2b.

Las ecuaciones propuestas por el modelo RWEQ para calcular la

degradación de K_r y C_{rr} para los suelos estudiados, producen subestimaciones. Cuando mayor fue el valor de K_r , más exacta fue la estimación del modelo, por lo cual, la incorporación al modelo de algún parámetro complementario para las labranzas que represente el valor de K_r inicial mejoraría las estimaciones de ORR. Esto sugiere que cada labranza posee efectos específicos sobre la degradación de K_r , dependiendo del suelo. Respecto a C_{rr} cuando menor fue la degradación, más aproximada fue la estimación del modelo, es decir que la mayor subestimación fue para el Ustipsamment confirmando que fue el suelo que sufrió mayor degradación luego de una lluvia. Estos resultados permiten rechazar la hipótesis 2c, ya que las ecuaciones propuestas por el modelo RWEQ para estimar la degradación de C_{rr} y K_r no fueron apropiadas para las condiciones de los suelos de la RSPC de Argentina, de acuerdo a las condiciones ambientales (lluvias) y de manejo analizadas. Los resultados precedentes sugieren que las ecuaciones de degradación de C_{rr} y K_r que se utilicen en el modelo para predecir la erosión eólica en la RSPC, deberán incluir el valor de rugosidad inicial o altura del camellón en el caso de ORR y la textura del suelo en el caso de ORR y RRR.

3.3. Resultados Obtenidos para Validar la Hipótesis 3

Hipótesis 3a.

Mayores rugosidades de la superficie del suelo disminuirán la erosión eólica.

Hipótesis 3b.

La rugosidad de la superficie de un Ustipsamment típico será menos eficiente para controlar la erosión eólica que la de un Haplustol éntico.

La Figura 22 muestra la relación existente entre la cantidad de material erosionado y el factor rugosidad del suelo (K'). Las relaciones entre ambas variables fueron, en todos los casos analizados (labranzas, velocidades de viento y tipo de suelo), de tipo polinomial de segundo grado. Este tipo de ajuste indica que a altas (K' cercano a 0) y a bajas rugosidades (K' cercano a 1) la erosión fue mayor, siendo, por lo tanto menor a rugosidades intermedias (K' entre 0.3 y 0.75, aproximadamente). Estos resultados muestran que rugosidades intermedias lograrían disminuir la tasa de erosión entre un 40 - 60 % en comparación con el suelo sin rugosidad (PR). Por otra parte, los camellones de mayor altura (25.4 cm), correspondientes a LB, generaron mayor tasa de erosión, inclusive que PR, superándola entre un 60 y un 70 % para las velocidades más altas. Estos resultados pueden deberse a que camellones muy altos (> 10.2 cm), incrementan la velocidad y la turbulencia del viento, modificando el perfil vertical de flujo de masa (Zhang et al., 2004) y en las crestas, desencadenando mayor erosión (Armbrust *et al.*, 1964; Marlatt y Hyder, 1970; Liu *et al.*, 2006). Algunos autores como Chepil y Milne (1941) y Armbrust *et al.* (1964), indican que la velocidad y la turbulencia del viento cambian en función de la altura del camellón, siendo mayor en la cresta del camellón y cuando mayor es su altura, lo que tiende a aumentar la cantidad de material erosionado. Encontrando, éstos últimos, que para camellones de 20.3 cm de altura y ráfagas de viento de 99 y 108 cm s^{-1} la velocidad de viento en la cresta del camellón supera a la velocidad alcanzada en una superficie lisa, incrementándose la erosión del camellón.

Las relaciones entre erosión y rugosidad fueron diferentes para cada suelo. El Ustipsamment, en todos los casos, se erosionó más que el Haplustol.

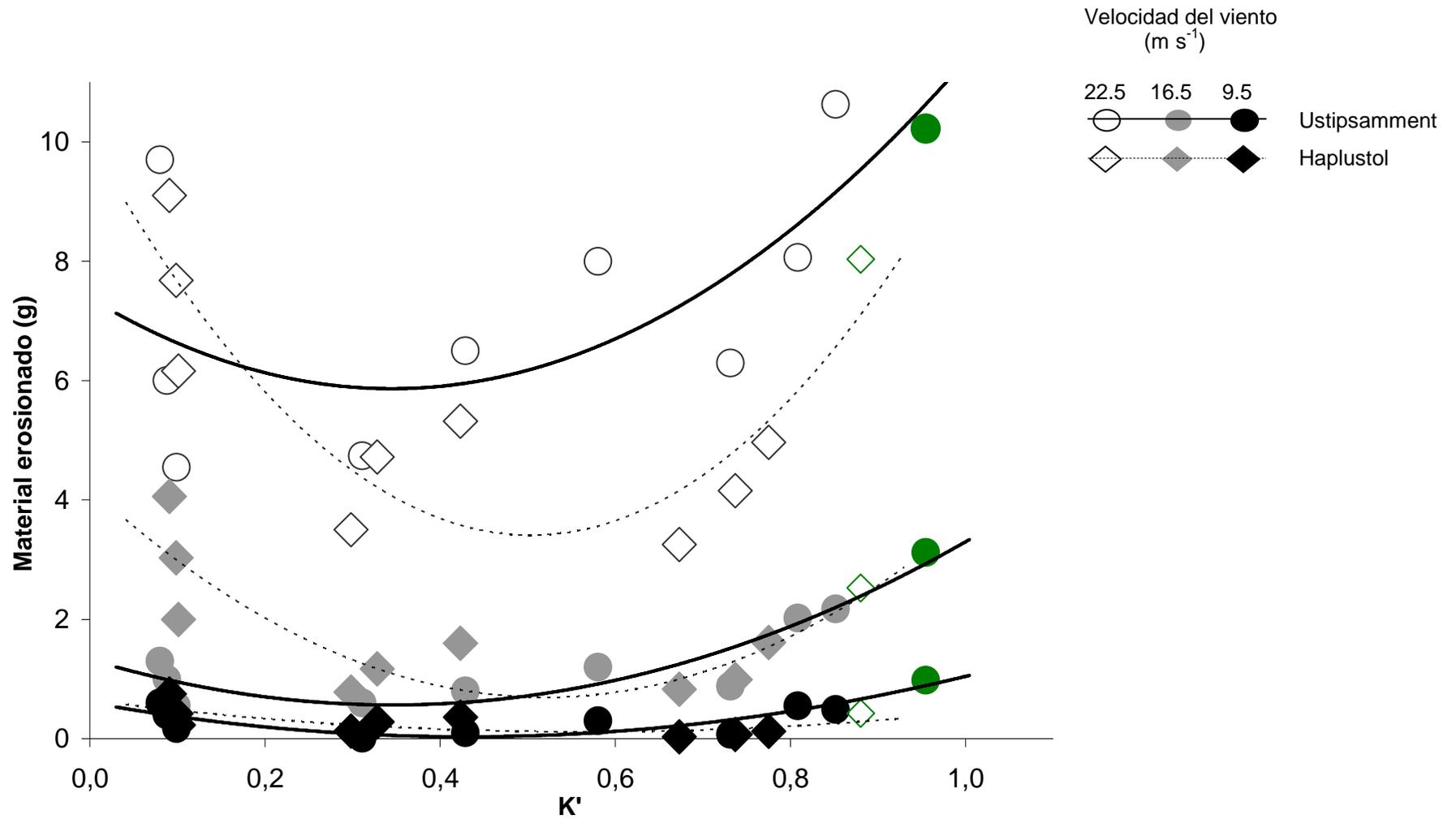


Figura 22: Material erosionado en función del coeficiente de rugosidad (K') a diferentes velocidades de viento, en dos suelos. Los círculos y rombos en color verde corresponden a datos de material erosionado en la parcela de referencia (PR) para los tratamientos mencionados.

Esto puede atribuirse a la mayor erosionabilidad del Ustipsamment respecto del Haplustol, ya que el primero presenta mayor proporción de agregados erosionables, menor desarrollo de la estructura y, debido a su textura más arenosa, presenta una gran variación de los contenidos de agua en los primeros cm del suelo. Esto lo torna más susceptible a erosionarse ante iguales condiciones climáticas. Estos resultados coinciden con los reportados por Aimar (2002) y Aimar *et al.* (2003) quienes encontraron que un Ustipsamment se erosiona 7 veces más que un Haplustol bajo condiciones de mínima rugosidad y cobertura, y con los resultados de Chepil (1953), quien encontró que los suelos más arenosos sufren mayor erosión debido a que su granulometría los torna más fácilmente erodables.

La cantidad de material erosionado para la velocidad de viento más elevada (22.5 m s^{-1}) fue hasta 10 veces mayor que la obtenida para la mínima velocidad de viento (9.5 m s^{-1}) y hasta 7 veces mayor que la de la velocidad intermedia (16.5 m s^{-1}). Estos resultados indican que la erosión eólica sería causada principalmente por ráfagas fuertes de viento, similares a las simuladas con el túnel de viento. Resultados similares encontraron Dong *et al.* (1987), He *et al.* (2004) y, Lui *et al.* (2006) quienes indicaron que la erosión eólica era causada por ráfagas de viento con velocidades mayores que 15 m s^{-1} , algo menores que las testeadas en este estudio.

Para todas las velocidades consideradas (9.5 , 16.5 y 22.5 m s^{-1}) la cantidad de material erosionado en las diferentes rugosidades producidas por las 3 labranzas (DT, DH y LB), fueron menores que la cantidad erosionada en PR para ambos suelos (Fig. 22, Tabla 6). Estos resultados indican que la rugosidad creada por las labranzas disminuye la erosión en relación al suelo no

rugoso, resultados que concuerdan con los de otros autores (Liu *et al.*, 2006). Una excepción fue la rugosidad generada por LB en el Haplustol, que produjo mayor erosión que PR. Este fenómeno puede estar relacionado con la generación de camellones muy altos con esta labranza, que producen mayores velocidades de viento y turbulencia en la parte superior de los mismos (Marlatt y Hyder, 1970; Liu *et al.*, 2006) incrementando la erosión en esa posición. Otros autores también señalan que la tasa de transporte de arena se incrementa exponencialmente conforme aumenta la altura de los camellones (Wu, 1987; Zhang *et al.*, 2004).

Tabla 6. Valores de los coeficientes de las regresiones existentes entre el factor de rugosidad (K') y el material erosionado (g) a diferentes velocidades de viento, en los dos suelos.

Suelos	Velocidad del viento (m s ⁻¹)	Coeficientes de las regresiones ¹			
		a	b	c	R ²
Ustipsamment típico	9.5	3.11	- 2.67	0.61	0.75 (p<0.01)
	16.5	6.39	- 4.41	1.33	0.87 (p<0.01)
	22.5	12.80	- 8.82	7.38	0.50 (p<0.05)
Haplustol éntico	9.5	1.68	- 1.89	0.65	0.44 (p<0.05)
	16.5	12.97	- 13.49	4.20	0.71 (p<0.01)
	22.5	26.06	- 26.25	10.02	0.71 (p<0.01)

¹ a, b y c son los parámetros de ajuste en la regresión de la forma $Y = -ax^2 + bx + c$ donde Y =Material erosionado (g) y x es K' .

A la velocidad más baja (9.5 m s⁻¹) la cantidad de material erosionado no varió significativamente (p<0.05) entre suelos para las diferentes rugosidades del suelo. Sin embargo, la cantidad de material erosionado en el Ustipsamment duplicó a la de Haplustol en la PR (0.98 y 0.42 g, respectivamente) y la triplicó

en DT (0.37 y 0.10 g, respectivamente).

Para la velocidad de viento intermedia (16.5 m s^{-1}) la mayor diferencia de erosión entre suelos se produce a valores de alta rugosidad (K' menores a 0.2) de LB, siendo significativamente mayor en el Haplustol que en el Ustipsamment (0.96 y 3.03 g, respectivamente). Nuevamente, PR se erosionó más en el Ustipsamment (3.14 g) que en el Haplustol (2.52 g), aunque dicha diferencia no fue significativa ($p > 0.05$).

Para la velocidad más elevada de viento (22.5 m s^{-1}) el material erosionado en el Ustipsamment fue mayor que en el Haplustol para casi todo el rango de variación de K' , llegando en algunos casos a duplicarla. La excepción se produjo para valores muy altos de rugosidad, ($K' < 0.2$) donde el material erosionado del Haplustol superó en un promedio de 1 g (13%) a la erosión del Ustipsamment. Sin embargo, se mantuvo la diferencia con PR, que fue un 30% mayor que en el Haplustol (10.22 y 8.03 g, respectivamente).

Los resultados presentados hasta el momento indican que, en general, el suelo más arenoso (Ustipsamment) es más susceptible a erosionarse, principalmente cuando presenta baja o nula rugosidad superficial. Su susceptibilidad se acentúa cuando la velocidad del viento es alta (22 m s^{-1}). Los camellones producidos por todas las labranzas logran disminuir notoriamente la cantidad de material erosionado en ambos suelos y velocidades testeadas, excepto en LB a bajas e intermedias velocidades, donde la cantidad de material erosionado superó a la de la PR, en el Haplustol. En el Ustipsamment, los camellones lograron disminuir la cantidad de material erosionado en un 18 a 85 %, mientras que en el Haplustol entre 4 y 76 %.

El análisis de los valores absolutos de erosión obtenidos en estudios de

simulación con túnel de viento ha sido cuestionado por muchos investigadores (Hasi, 1997; Li y Ni, 1998; Zhang *et al.*, 2002). Esto se debe a que el flujo de aire y las condiciones de la superficie del suelo en el túnel de viento no son exactamente iguales a las existentes en condiciones naturales (Hagen, 2001).

Otros autores han utilizado este tipo de estudio para evaluar la erosión absoluta en diferentes condiciones (Chepil y Doughty, 1939; Woodruff *et al.*, 1968; Fryrear y Armbrust, 1969) pero los mismos mencionan que los resultados deben ser considerados como orientativos y nunca utilizarse para realizar extrapolaciones directas a condiciones naturales. En este contexto, puede deducirse que los resultados discutidos anteriormente, referidos a tasas absolutas de erosión en las condiciones evaluadas, deben utilizarse solamente para deducir grandes tendencias entre diferentes suelos, velocidades de viento y rugosidades superficiales.

La forma más conveniente para evaluar el efecto de la rugosidad sobre la erosión eólica es analizar las tasas relativas de erosión (cociente entre la erosión producida en condiciones de rugosidad orientada y la obtenida en una superficie lisa), parámetro utilizado por la mayoría de los modelos disponibles para predecir erosión eólica. El análisis de esta variable permite comparar directamente situaciones muy disímiles, como diferentes rugosidades de la superficie del suelo o diferentes velocidades de viento.

La Figura 23 muestra la variación de la erosión relativa en función de K' para cada suelo. El análisis conjunto de todos los tratamientos de velocidad de viento y labranzas en cada suelo fue posible porque las correspondientes regresiones, analizadas por medio de Excel, no manifestaron diferencias entre sí. Esto permitió unificar todos los tratamientos de un mismo suelo en una

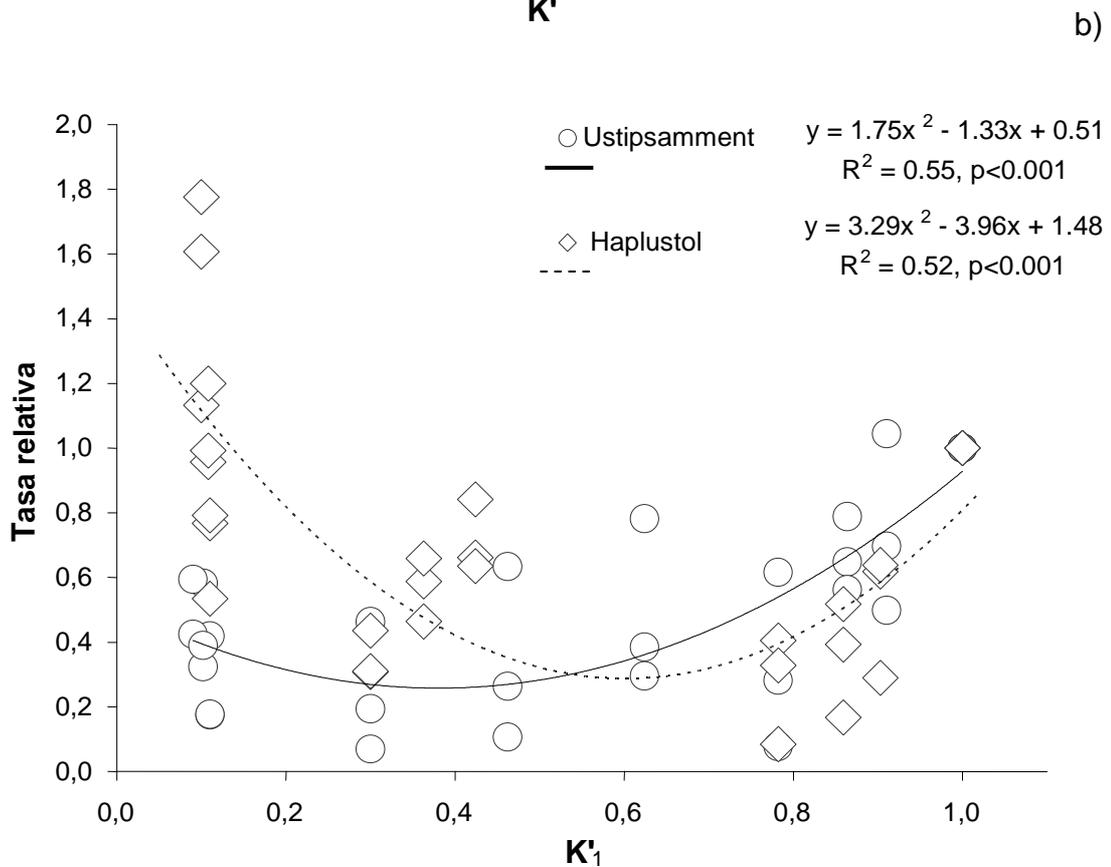
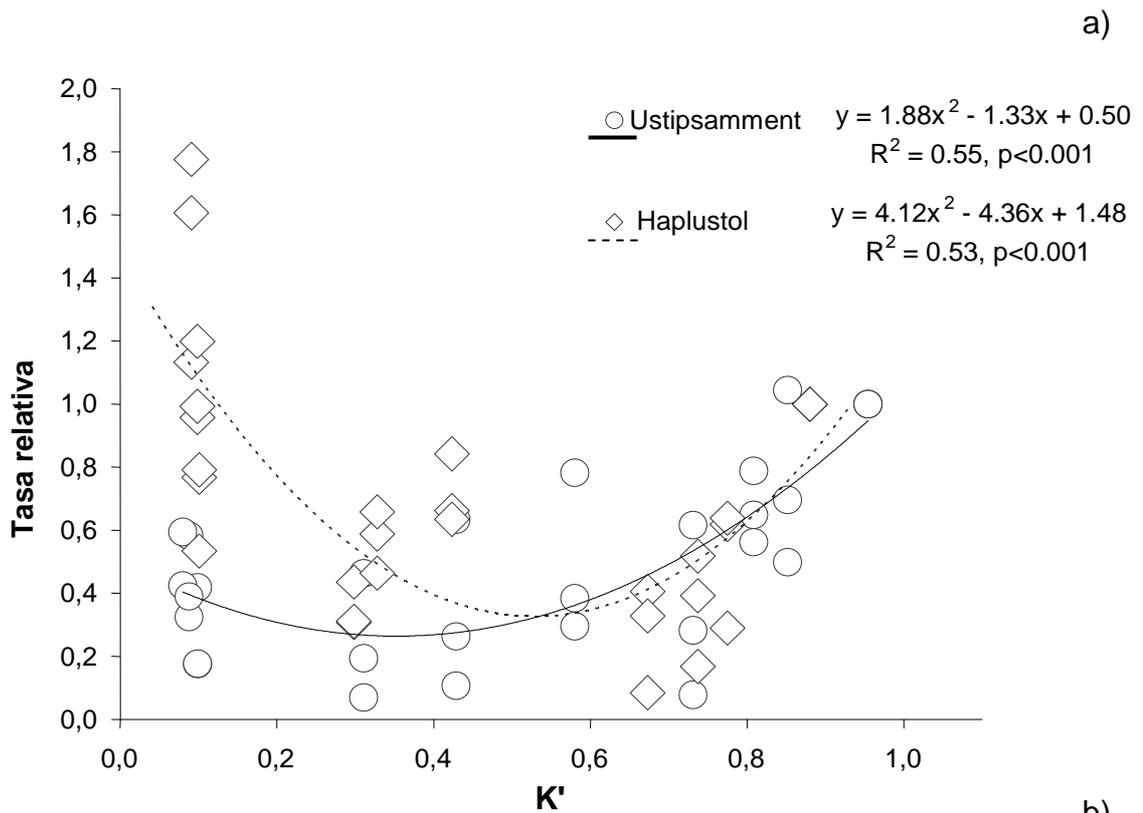


Figura 23. Variación de la tasa relativa de erosión de dos suelos en función del coeficiente de rugosidad (K') calculado a) en base a los valores de rugosidad orientada (K_r) y no orientada (C_{rr}) y b) considerando solamente K_r ($C_{rr}=0$).

regresión común.

El mejor ajuste entre erosión relativa y K' se logró con una ecuación polinomial de 2do grado ($p < 0.001$) para los dos suelos. Este tipo de ajuste indica que a altas rugosidades (K' cercano a 0) y a bajas rugosidades (K' cercano a 1) la tasa relativa de erosión fue mayor, siendo, por lo tanto menor a rugosidades intermedias (K' entre 0.3 y 0.75, aproximadamente). En general, las tendencias de erosión absoluta fueron coincidentes con las de las tasas relativas. Las formas de las curvas de ajuste, sin embargo, fueron diferentes para cada suelo: para el Haplustol ésta presentó la forma exacta de una parábola, indicando elevadas tasas de erosión para valores altos y bajos de K' , es decir tendencias similares a las de la erosión absoluta. En el Ustipsamment, sin embargo, solamente se manifestó un incremento de la erosión relativa a valores elevados de K' (bajas rugosidades), pero no a bajos valores de K' . Esto indica que la erosión relativa posee tendencias diferentes en ambos suelos a rugosidades elevadas (bajos valores de K') y similares a rugosidades bajas. Prácticamente todas las rugosidades simuladas (K' de 0 a 0.85) lograron disminuir la tasa de erosión entre un 20 y un 80 %, en comparación con la ocurrida en PR. Una excepción fue el Haplustol, donde algunos valores de K' bajos superaron en un 10 a 20 % la tasa relativa de la PR, coincidiendo con el comportamiento de la cantidad absoluta de erosión. Este último dato no era esperable, ya que, debido a la textura más arenosa del Ustipsamment, se esperaría que las turbulencias que ocurren en la cresta de los camellones afectaran más a las partículas sueltas de este suelo que a las más agregadas del Haplustol. Dicho fenómeno, puede estar relacionado con que el mayor grado de desarrollo del Haplustol determinó que la altura de los camellones se

mantuviera durante todo el período de medición (3 min) mientras que en el Ustipsamment la altura de los camellones pudo haber disminuido llevando esto, probablemente, a que la velocidad del viento en la cresta y la turbulencia disminuyeran, en cambio en el Haplustol pudo, al contrario, haberse mantenido alta aumentando la cantidad de material erosionado, incluso superando a la de PR.

Las curvas de ajuste entre erosión relativa y K' de ambos suelos prácticamente se superpusieron a valores de $K' > 0.5$, lo que permite el ajuste de una única ecuación para ambos suelos ($y = 2.00x - 0.96$, $R^2 = 0.49$; $p < 0.001$). Mediante esta ecuación sería posible calcular la erosión relativa y facilitar el uso de modelos predictivos del proceso para suelos de la RSPC.

Por medio de observaciones directas realizadas luego de cada simulación y principalmente a la máxima velocidad de viento, pudo comprobarse que en ambos suelos existió una acumulación residual de material en el entresurco, al perderse el material más fino. En el Haplustol el material acumulado estaba formado por agregados y partículas finas, mientras que en el Ustipsamment sólo se acumularon granos minerales individuales. Su color blanquecino indicaría que eran minerales de cuarzo. Esto demuestra nuevamente la mayor susceptibilidad que presentan los camellones de éste último suelo frente eventos sucesivos de erosión.

El factor K' describe el efecto combinado de ambas rugosidades normalmente en dos direcciones de viento dominantes: paralela o perpendicular a los camellones. Cuando la dirección del viento es paralela a los camellones el efecto de K_r es despreciable y sólo se tiene en cuenta C_{rr} , mientras que en la dirección que presentaron los camellones en este estudio las dos rugosidades

son importantes. Sin embargo, como los suelos estudiados tienen poca evolución se esperaría que C_{rr} no tenga mucha implicancia en el valor de K' . Por lo tanto medir solo K_r facilitaría los cálculos en los modelos y ahorraría tiempo y esfuerzo al no ser necesario medir C_{rr} en el campo.

La Figura 23 b presenta la variación de la erosión relativa en función de K' determinada solamente por la rugosidad orientada (K'_1), considerando a la no orientada (C_{rr}) igual a cero. La ecuación que mejor ajustó ($p < 0.001$) a ambas variables en ambos suelos fue de tipo polinomial de 2do grado. En el Ustipsamment la curva de ajuste entre erosión relativa y K'_1 fue muy similar a la obtenida con K' . Al comparar los coeficientes entre ambas curvas para el Ustipsamment, se observó que el coeficiente cuadrático a varió 0.13, el coeficiente lineal b fue similar (-1.33) y los valores de c difirieron en 0.01. Estos resultados indican que en el Ustipsamment la rugosidad no orientada (C_{rr}) no afectó significativamente la tasa relativa de erosión y que el eventual control de la erosión dependería en gran medida de la rugosidad orientada (K_r). Estos resultados coinciden con los encontrados por Fryrear (1984) quien resaltó que los camellones (K_r) son más efectivos para reducir la erosión eólica que la rugosidad no orientada (C_{rr}). Además, mantienen relación con lo discutido en párrafos anteriores, donde un suelo que parte inicialmente con poca agregación natural sumado a la débil formación de *clods* (producto de las labranzas) lleva a que C_{rr} adquiera un valor bajo sin demasiada importancia en el control de la erosión del Ustipsamment.

El efecto de C_{rr} sobre la erosión relativa en el Ustipsamment tampoco fue relevante en PR, ya que el valor de K' para una superficie lisa fue 0.954 y 1 para K'_1 . Estos resultados se deberían a que la rugosidad no orientada en el

Ustipsamment es prácticamente nula, ya que la formación de agregados es muy limitada dada la baja proporción de sustancias aglutinantes, como arcillas o MO. Sin embargo, los camellones creados por las labranzas lograron controlar adecuadamente la erosión, reduciéndola, en promedio, un 55 % con respecto a PR.

En el Haplustol, la relación entre erosión relativa y K'_1 , resultó muy similar a la existente entre la erosión relativa y K' , para valores de rugosidad inferiores a 0.5, mientras que para valores de rugosidad mayores a 0.5 las curvas fueron algo diferentes. Los coeficientes a y b fueron menores en la curva que relaciona erosión relativa con K'_1 (3.29 y 3.96, respectivamente) que con K' (4.12 y 4.36, respectivamente) en cambio los valores de c fueron iguales para ambas curvas. El hecho de que la pendiente fuera menor entre las curvas demuestra que C_{rr} tuvo mayor efecto sobre la tasa relativa de erosión en el Haplustol que en el Ustipsamment, lo cual era esperable, debido a la mayor agregación natural y formación de *clods* que presenta el primer suelo. Además, estos resultados indican que la rugosidad no orientada tuvo mayor incidencia sobre las labranzas que generan camellones más bajos (DT, $K_r=0.85$) que en las labranzas que producen camellones de mayor altura, principalmente LB, donde el valor K' no fue afectado por la inclusión o no de la rugosidad no orientada del suelo.

En PR, la rugosidad no orientada del suelo fue mayor (menor valor de K') en el Haplustol (0.88) que en el Ustipsamment (0.95) y K'_1 tuvo un valor 1 cuando C_{rr} fue cero. Estos resultados indican que C_{rr} tiene mayor efecto sobre el control de la erosión relativa en el Haplustol (12%) que en el Ustipsamment (5%), resultados que guardan relación con la mejor agregación que existe en el Haplustol respecto del Ustipsamment.

Considerando que la rugosidad orientada explica gran parte de la erosión eólica, algunos autores (Armbrust *et al.*, 1964; Lyles y Tatarko, 1987; Biielders *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2006) han propuesto utilizar a la altura de los camellones como una medida simplificada de K' que permita su uso en modelos de simulación para predecir erosión. Esto simplificaría el cálculo de la rugosidad orientada para su aplicación en los mismos.

La Figura 24 muestra la tasa relativa de erosión en función de la altura inicial de los camellones. Estas alturas corresponden a las encontradas en cada tratamiento (tipo de suelo y labranza) luego de las simulaciones de degradación de la rugosidad por parte del agua de lluvia (Capítulo 3.2). Puede observarse que en todos los casos (labranzas y suelos) existieron relaciones lineales negativas significativas al 5%, lo que indica que, en todos los tratamientos, a medida que la rugosidad se degrada por efecto de la lluvia, la erosión se incrementa linealmente, a excepción de la ecuación para DH del Ustipsamment que fue significativa pero con $p > 0.10$.

Sin embargo, no necesariamente una mayor altura inicial del camellón se correspondió con una menor tasa relativa de erosión. En el Haplustol mayores alturas iniciales de LB (25.4 cm), generaron mayor erosión relativa (en promedio 0.7) en comparación con las otras dos labranzas (DH y DT), cuyas alturas iniciales fueron inferiores (5.1 y 2.54 cm, respectivamente) y generaron tasas de erosión de 0.35 y 0.27 en promedio, respectivamente. Esto también se evidencia en la mayor pendiente de la regresión que tuvo LB (-0.60) respecto DH (-0.49) y DT (-0.29). Este mismo comportamiento se observó a medida que cada labranza se degradó, es decir que, a pesar de que las alturas iniciales de los camellones de las tres labranzas decayeron producto de las lluvias, en todos los casos los

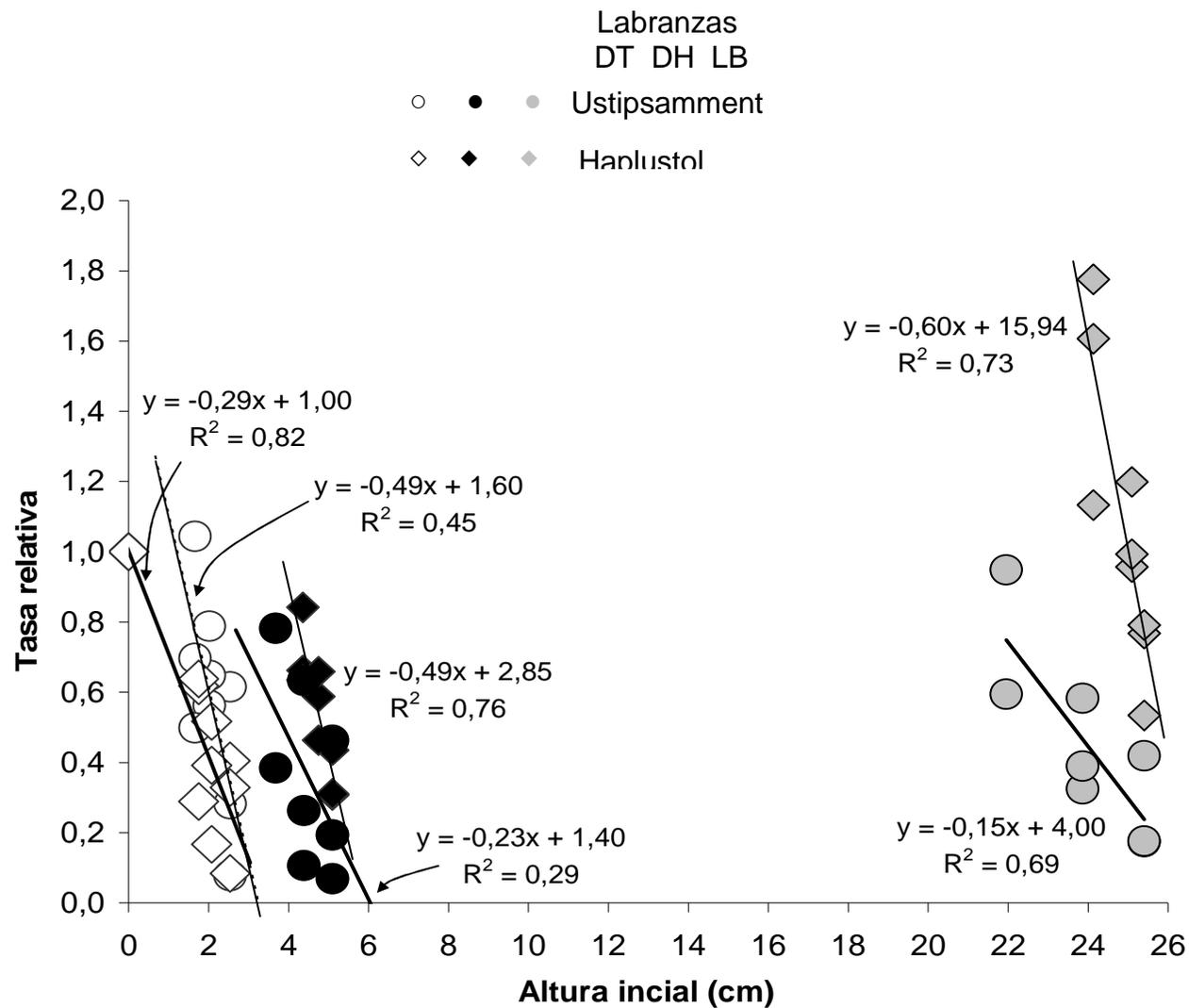


Figura 24. Variación de la tasa relativa de erosión en función de la altura inicial del camellón en tres sistemas de labranzas y dos suelos.

camellones de LB mantuvieron la mayor altura y en consecuencia la mayor tasa relativa de erosión en comparación con DH y DT, inclusive en algunos casos superó en un 60 al 80 % la erosión obtenida en la PR. Estos resultados guardan relación con los presentados y discutidos en las Fig. 22 y 23, los cuales, como se explicó anteriormente, podrían deberse a las mayores velocidades y turbulencias que se producen en las crestas de los camellones de mayor altura (Armbrust *et al.*, 1964; Marlatt y Hyder, 1970; Liu *et al.*, 2006) incrementando la erosión en esa zona.

En el Ustipsamment, las menores alturas de camellón (DT) generaron mayor erosión relativa (0.33), seguido luego por la tasa relativa de los camellones de mayor altura (LB) 0.26 y la de los camellones de altura intermedia (DH) 0.24. La mayor tasa de erosión generada por camellones más bajos (DT) se ve reflejada en la mayor pendiente de la ecuación de regresión (-0.49), seguida por DH (-0.23, $p > 0.10$) y LB (-0.15). Este mismo comportamiento se observó a medida que la altura de cada labranza decayó producto de las lluvias, donde alturas muy bajas de camellón generaron las mayores tasas de erosión, inclusive, hasta igualar a la erosión obtenida en la PR, tal es el caso de una altura de camellón de 1.6 cm.

En el Ustipsamment, prácticamente en todos los casos la erosión relativa fue menor que la obtenida en PR, mientras que el Haplustol presentó valores que sobrepasaron en un 60 a 80 % a la erosión obtenida en PR, estos valores corresponden a los camellones de mayor altura.

La diferencia de comportamiento de los camellones producidos por LB, entre suelos, se ve reflejada en la mayor pendiente de la regresión obtenida para el Haplustol (-0.60) respecto a la del Ustipsamment (-0.15). La posible causa de

estos resultados sería la mayor agregación natural y mejor estructura que pudieron haber influido en la estabilidad de los camellones (Armbrust *et al.*, 1964; Fryrear, 1984; Zhang *et al.*, 2004). Respecto a los camellones de menor altura (DT), la mayor tasa de erosión relativa se produjo en el Ustipsamment, lo cual se vio reflejado en la mayor pendiente de la regresión (-0.49) con respecto a la del Haplustol (-0.29). La posible explicación a estos resultados también fueron discutidos anteriormente y guarda relación por un lado con la menor agregación natural que presenta el Ustipsamment y por el otro con el escaso disturbio que genera DT (menor profundidad de laboreo y menor formación de pseudo-agregados). En estas condiciones el camellón se habría erosionado más que en el Haplustol. Por último, los camellones de altura intermedia (DH) en los dos suelos mostraron un comportamiento intermedio respecto a las otras dos labranzas, siendo la pendiente para el Haplustol (-0.49) mayor que la del Ustipsamment (-0.23).

Los resultados presentados en la Figura 24, en general, indican que a medida que la altura inicial decrece, la tasa relativa de erosión se incrementa y dicho incremento depende del tipo de labranza y del tipo de suelo. Camellones muy altos o muy bajos, dependiendo el tipo de suelo generaron las mayores tasas relativas de erosión, siendo las más efectivos para controlar la erosión los camellones de altura intermedia. Además la erosión relativa fue diferente entre labranzas dentro de cada suelo: en el Ustipsamment, camellones muy bajos o muy altos generaron las tasas relativas de erosión más elevadas, mientras que en el Haplustol, en general, a medida que aumentó la altura de los camellones, mayores fueron las tasas relativas de erosión, superando la tasa de erosión de LB a la obtenida en PR. Salvo esta excepción, los camellones creados por las

diferentes labranza, lograron disminuir la tasa de erosión en comparación con el suelo sin rugosidad (PR), coincidiendo con resultados de otros autores como Armbrust *et al.* (1964), Saleh (1994), Biielders *et al.* (2000) quienes resaltaron que los camellones con una altura intermedia, óptima para cada suelo, logran controlar adecuadamente la tasa de erosión, y también con nuestros resultados presentados en figuras anteriores.

Otro aspecto poco conocido acerca del proceso de erosión eólica es el inverso al que se ha discutido hasta el momento, es decir cuál es la tasa de degradación de los camellones por efecto del impacto del material erosionado, proceso conocido como corrasión (Buschiazzo y Aimar, 2003). Por ello, se analizó la variación de la altura de los camellones (CR) calculada con la Ec. [15] en función de la cantidad de material movilizado en cada tormenta simulada con el túnel de viento.

La Figura 25 muestra que CR se relacionó en forma lineal y negativamente con la cantidad de material erosionado en todos los casos analizados, lo que refleja el poder degradativo de las partículas transportadas.

Los tratamientos de labranza DT y DH, que poseen camellones de menor altura, presentaron cambios de K_r similares ante el poder corrasivo de una determinada cantidad de material erosionado, independientemente de las velocidades de viento, ajustándose para ambas labranzas una sola ecuación altamente significativa, comportamiento que se dió en los dos suelos.

En el Ustipsamment, la regresión de ajuste para DT y DH fue $y = -0.06x + 0.85$, $R^2 = 0.73$, mientras que en LB, que presenta los camellones más altos, CR varió poco en función de la cantidad de material erosionado ($y = -0.03x + 0.97$; $R^2 = 0.95$, $p < 0.001$). LB presentó la mitad de la pendiente (-0.03)

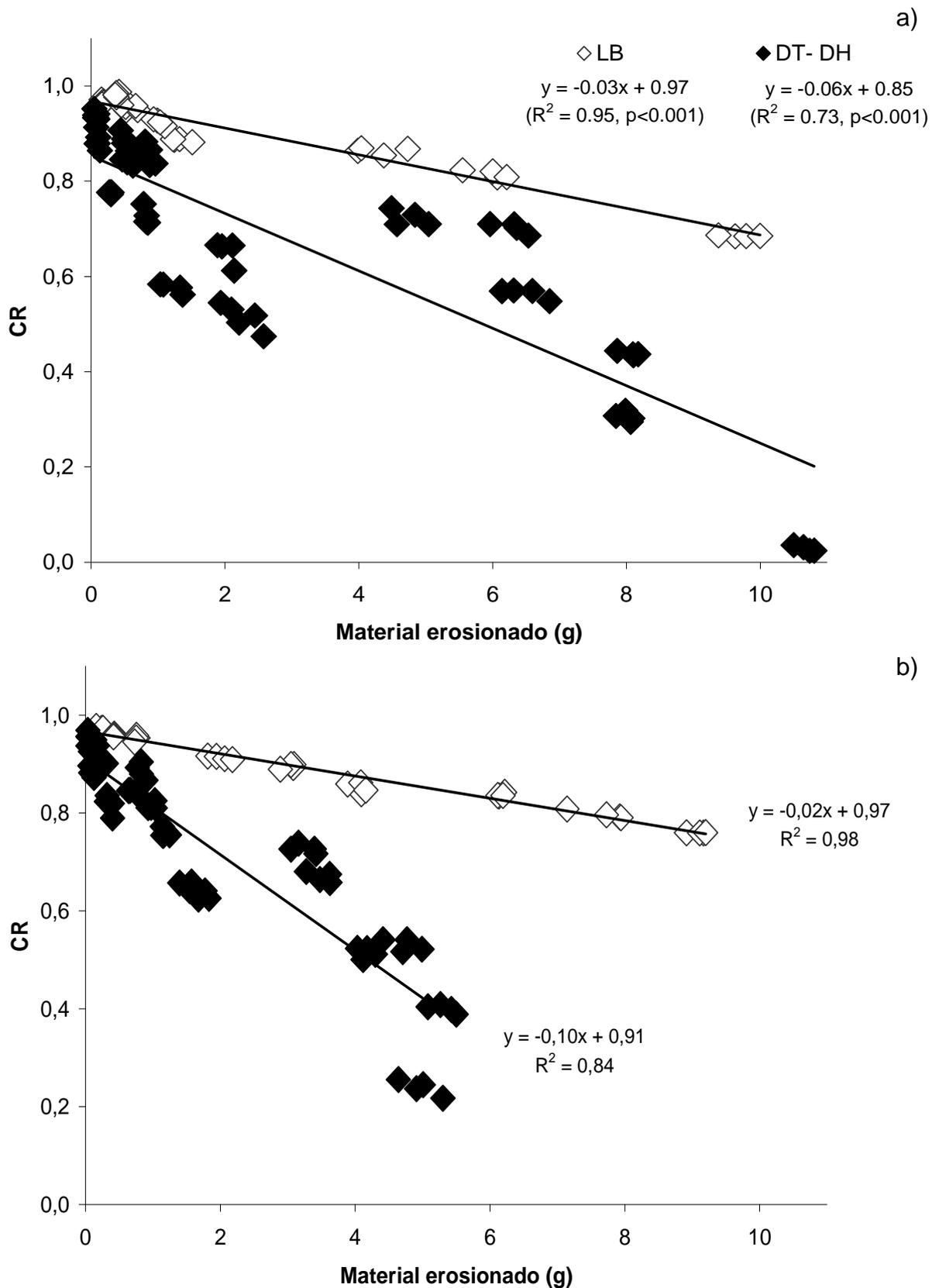


Figura 25. Valores de CR (K_r final/ K_r inicial) en función de la cantidad de material erosionado para tres labranzas, en a) el Ustipsamment y b) el Haplustol.

obtenida para el conjunto de labranza DT-DH (-0.06). Estos resultados indican que los camellones de mayor altura (LB) se degradaron relativamente menos que los de menor altura (DT y DH), es decir que la altura inicial del camellón condiciona la degradación de la rugosidad. Ante una misma cantidad de material erosionado, por ejemplo 8 g, Kr varió un 20 % de su valor original, mientras que en las otras dos labranzas (DT y DH) ante la misma cantidad de material erosionado, Kr varió 60%. Esto demuestra que los camellones de mayor altura fueron más resistentes, proporcionando esto, una mayor ventaja frente a sucesivos eventos de erosión.

El Haplustol presentó un comportamiento similar al Ustipsamment, ya que a medida que aumentó la cantidad de material erosionado decreció CR para las tres labranzas.

También en ambos suelos, DT y DH (camellones de menor altura) ajustaron a una sola ecuación de regresión altamente significativa entre material erosionado y CR, independientemente de las velocidades de viento. Dicha ecuación permite conocer la degradación de Kr en función de, solamente, la herramienta de labranza. La regresión que ajustó para DT y DH fue $y = -0.10x + 0.91$ ($R^2 = 0.84$) mientras que para LB $y = -0.02x + 0.97$ ($R^2 = 0.98$). Según el valor de la pendiente DT y DH (camellones más bajos) presentaron mayor pendiente (-0.10) que LB (-0.02) (camellones más altos), coincidiendo con los resultados del Ustipsamment. En LB, un amplio rango de material erosionado (0 – 10 g.) generó una pequeña variación de CR (1- 0.75), tal como lo refleja el bajo valor de la pendiente de la recta de regresión (-0.02). Estos resultados indican que ante la erosión de 1 g de suelo la degradación relativa de la altura del camellón fue menor que la ocurrida para las otras dos

labranzas (DT y DH). Si se considera la misma cantidad de material erosionado que en el suelo anterior (8 g), en el caso de LB, Kr sólo varía un 20% de su valor original, en cambio en las otras dos labranzas, una cantidad similar de material erosionado produciría un cambio de Kr del 90 % de su valor original. Esto demuestra, al igual que en el Ustipsamment, que los camellones de mayor altura son más efectivos para controlar la erosión frente a eventos sucesivos de erosión debido a su mayor resistencia.

El cambio de Kr en LB fue prácticamente similar en ambos suelos, pero el cambio de Kr en DT y DH varió más en el Haplustol que en el Ustipsamment, en coincidencia con los resultados obtenidos y presentados en figuras anteriores donde se demuestra que los surcos de menor altura (DT y DH) sufren relativamente mayor degradación que los de mayor altura, acentuándose más dicha disminución en el Haplustol que presenta mayor formación de *clods* (más débiles frente a procesos erosivos) debido a su mayor agregación natural.

La degradación total de los camellones de DT y DH se produce con sólo 9 g en el Haplustol y con 14 g en el Ustipsamment. En LB este nivel de degradación se logra con 48 g en el Haplustol y 32 g en el Ustipsamment. Las diferencias de degradación de Kr se deben al tipo de suelo (agregación natural y formación de *clods*) y de labranza utilizada debido a que altura inicial del camellón condiciona la tasa de degradación y por ende la resistencia de los camellones frente a un evento erosivo. Los camellones más altos fueron más resistentes que los de menor altura frente al mismo evento erosivo.

La ecuación obtenida para las tres velocidades de viento juntas permite conocer la degradación de Kr en función de la cantidad de material que

se erosione luego de una simulación con el túnel y considerando únicamente la herramienta de labranza que se utilice.

Se puede concluir que la existencia de rugosidad en la superficie del suelo disminuye la erosión eólica en comparación con una superficie lisa, en ambos suelos (Haplustol e Ustipsamment) debido al entrapamiento de partículas entre los camellones y a la reducción de la velocidad del viento. Sin embargo existió una altura crítica de camellón (25.4 cm) donde la velocidad del viento y las turbulencias aumentaron generando mayor erosión y superando, en algunos casos, la erosión de la PR. Estos resultados nos permiten aceptar parcialmente la hipótesis 3a.

La eficiencia de la rugosidad para controlar la erosión dependió del tipo de labranza y tipo de suelo. En general, Crr y Kr fueron menos eficientes para controlar la erosión eólica en el Ustipsamment que en el Haplustol a baja y nula rugosidad, debido, principalmente, a la mayor erosionabilidad que presenta el primer suelo respecto del segundo dado la mayor proporción de agregados erosionables y menor desarrollo de la estructura. Sin embargo, a altas rugosidades el Haplustol presentó mayor erosión que el Ustipsamment principalmente por la disminución de la eficiencia de Kr. Esto, posiblemente se debió, a que el mayor grado de desarrollo del Haplustol hizo que la altura de los camellones se degradada menos frente a la acción corrosiva de las partículas erosionadas, manteniendo alta la velocidad del viento y las turbulencias en la zona donde mayor erosión existe, la cresta del camellón. Mientras que en el Ustipsamment la altura de los camellones pudo haber disminuido llevando esto, probablemente, a que la velocidad del viento en la cresta y la turbulencia disminuyeran y por ende la cantidad de material erosionado. Estos resultados

permiten aceptar parcialmente la hipótesis 3b.

De acuerdo con estos resultados mantener a estos suelos de la RSPC con cierta rugosidad es fundamental para evitar que se erosionen a grados irreversibles, principalmente en los Ustipsammentes que presentan mayor susceptibilidad.

CAPITULO 4

CONCLUSIONES

Este trabajo ha tenido por objetivos: a) evaluar la relación entre parámetros climáticos y velocidad umbral del viento, b) cuantificar la degradación de la rugosidad de la superficie del suelo en función de la energía y la cantidad de lluvia, y c) cuantificar la erosión eólica en función de la rugosidad de la superficie del suelo. Todos estos estudios se realizaron en dos suelos típicos de la región semiárida pampeana central de Argentina (RSPC).

Los resultados obtenidos con respecto al primer objetivo permiten concluir que la velocidad umbral de viento (μt) fue menor en invierno (6.10 m s^{-1}), intermedia en primavera y verano (8.22 y 8.28 m s^{-1} , respectivamente) y mayor en otoño (26.48 m s^{-1}). Estas diferencias estuvieron relacionadas con variaciones de la velocidad del viento, de las precipitaciones, la temperatura y la humedad relativa, factores que influyen sobre las condiciones de la superficie del suelo, produciendo una alta intermitencia en la actividad de saltación. Primavera y verano presentaron altas precipitaciones y temperaturas y bajas humedades relativas, invierno, aún con bajas temperaturas, presentó altas velocidades de viento y suelos secos, mientras que otoño presentó suelos húmedos, producto de altas precipitaciones y humedades relativas.

Estos resultados indican que en otoño las condiciones ambientales no favorecen la ocurrencia de erosión eólica y que todo lo contrario ocurre en primavera, verano e invierno. En estas estaciones deberían desarrollarse sistemas de manejo de suelos que tiendan a mantener las superficies con cobertura y con rugosidad suficiente.

El valor de μt promedio anual que debería usarse en los modelos de predicción de la erosión eólica para suelos de la RSPC, 7.53 m s^{-1} , resultó superior al utilizado por RWEQ (5 m s^{-1}) e inferior a la WEPS (8 m s^{-1}). El

uso de este nuevo valor en los modelos de simulación disminuiría, por ende, los cálculos de pérdida de suelos por erosión eólica en el primer modelo y los incrementaría en el segundo.

Sería recomendable, de acuerdo a los resultados obtenidos, que los modelos de predicción de erosión eólica consideraran en sus cálculos las variaciones de μt a lo largo del año. El uso de un único valor μt anual debería reflejar las condiciones ambientales y de suelo del sitio bajo estudio.

Dado que los sistemas convencionales de labranza son aún muy difundidos en la RSPC (Caviglia, com. pers.) es que revisten importancia las rugosidades de la superficie del suelo que produzcan las herramientas de labranza, ya que pueden tener distinta eficiencia de control de la erosión. Por esta razón se analizó el estado de la rugosidad de la superficie del suelo, tanto no orientada como orientada, en función del efecto degradante de las lluvias y su relación con la erosión.

La degradación de K_r , la rugosidad orientada, (ORR) fue variable entre herramientas de labranza, el tipo de suelo y la cantidad de lluvia. En el suelo más estructurado (Haplustol) la degradación de K_r fue altamente dependiente de su valor inicial, siendo menor cuando mayor fue éste. En el suelo menos estructurado (Ustipsamment) el cambio de K_r por efecto de la lluvia aplicada fue menos dependiente del valor inicial. Esto respondió a que todas las rugosidades, independientemente de su valor inicial, se degradaron casi totalmente por efecto de la lluvia.

Por otra parte, la degradación de C_{rr} , la rugosidad no orientada, (RRR) no fue afectada por el tipo de herramienta de labranza, sino que dependió de las propiedades intrínsecas del suelo, principalmente textura y estructura.

La degradación de ambos tipos de rugosidades se relacionó con la cantidad de lluvia (CUMR) y la energía de la lluvia (CUMEI). El efecto de CUMR y CUMEI sobre K_r varió, nuevamente, en función de la altura inicial de los camellones, siendo éstos más estables cuando mayor fue su altura inicial y en el suelo con mayor agregación. En cambio, la variación de C_{rr} en función de CUMR y CUMEI fue, en ambos suelos, similar para todas las herramientas de labranza. El efecto de la energía y la cantidad de lluvia fue mayor sobre los agregados y *clods* del suelo más arenoso que los del franco arenoso, que resultaron más estables.

Las ecuaciones de regresión utilizadas para relacionar CUMEI y CUMR con la degradación de ambas rugosidades tuvieron mayor coeficiente de determinación (R^2) en el Ustipsamment que en el Haplustol, reflejando que el primero fue más sensible a pequeños cambios en la energía y cantidad de la lluvia, como producto de la mayor labilidad de sus agregados.

Se pudo concluir que CUMR es el parámetro más adecuado para predecir la degradación de K_r y C_{rr} en los modelos de predicción de la erosión eólica, debido, no sólo al buen ajuste que presentaron sus ecuaciones, sino a la mayor simplicidad de su cálculo en comparación con la energía de la lluvia (CUMEI) parámetro utilizado por la mayoría de los modelos disponibles en la actualidad.

Las ecuaciones propuestas por el modelo RWEQ para calcular la degradación de K_r y C_{rr} para los suelos estudiados, producen subestimaciones. Cuando mayor fue el valor de K_r , más exacta fue la estimación del modelo, por lo cual la incorporación de algún parámetro complementario que represente el valor de K_r inicial mejoraría las estimaciones

de ORR. Cuando menor fue la degradación de Crr mejores fueron las predicciones del modelo. Esto indica que la mayor subestimación se produjo al predecir cambios de Crr en el Ustipsamment que en el Haplustol.

Se obtuvo una ecuación para predecir la degradación relativa de Kr por efecto de la aplicación de una determinada cantidad de lluvia cuya variable independiente es el valor inicial de Kr. Esta ecuación fue $y = 41.33x^{-0.72}$ ($R^2=0.86$, $p < 0.001$) para el Haplustol e $y = 46.24x^{-0.27}$ ($R^2 = 0.58$, $p < 0.001$) para el Ustipsamment, siendo y la degradación relativa y x el valor inicial de Kr. Estas ecuaciones permitirían predecir la degradación relativa de Kr simplemente conociendo el valor inicial de Kr para cualquier magnitud de lluvia. Estos resultados corresponden a suelos e las características de los aquí analizados y a un rango de altura de camellón de 0 a 26 cm. Deberá analizarse si son válidos para otras condiciones.

Todas las rugosidades simuladas, expresadas por K' (producto de la combinación de Crr y Kr) que variaron entre 0 y 0.85, lograron disminuir la erosión relativa (cociente entre la erosión producida en condiciones de rugosidad orientada y la obtenida en una superficie lisa) entre un 20 y un 80 % con respecto al tratamiento sin rugosidad (PR), en ambos suelos. La excepción a esta tendencia fue la sembradora lister (LB), labranza que generó camellones de mayor altura y por ende un Kr más alto. En esta labranza, la tasa relativa de erosión del Haplustol superó a la de PR, debido a las mayores velocidades y turbulencias del viento que se habrían producido en la parte más elevada de los camellones.

Los ajustes entre erosión relativa y K' de ambos suelos se superpusieron a valores de $K' > 0.5$, permitiendo el ajuste de una única ecuación ($y = 2.00x -$

0.96, $R^2 = 0.49$; $p < 0.001$). A rugosidades elevadas (bajos valores de K') la erosión relativa presentó distintas tendencias en ambos suelos, ajustándose ecuaciones diferentes para cada uno.

La incidencia de Crr sobre el valor de K' fue relativamente baja en ambos suelos: Crr controló, como máximo, un 12% de la erosión relativa en el Haplustol y sólo un 5% en el Ustipsamment, resultado que guarda relación con la mejor agregación del Haplustol. En éste, la mayor incidencia de Crr sobre K' se produjo en aquellas labranzas que generaron camellones más bajos (DT, $K_r = 0.85$), mientras que en las labranzas con camellones de mayor altura, principalmente LB, el valor de K' no fue afectado por la inclusión de Crr. Estos resultados permiten deducir que es posible utilizar solamente a la rugosidad orientada a fin de evaluar los efectos de la rugosidad sobre las tasas de erosión en los suelos estudiados.

Considerando que la rugosidad orientada explica gran parte de la erosión eólica se propuso utilizar a la altura de los camellones como una medida simplificada de K' en modelos de predicción de la erosión eólica. Coincidiendo con los resultados mencionados más arriba, camellones muy altos o muy bajos generaron mayores tasas relativas de erosión que camellones de altura intermedia. La altura óptima del camellón dependió del tipo de suelo: en el Haplustol varió entre 2 y 6 cm (DT y DH), mientras que en el Ustipsamment varió entre 5.1 y 25.4 cm (DH y LB, respectivamente).

Otro aspecto que se analizó en este estudio fue la tasa de degradación de los camellones por efecto del impacto del material erosionado. La variación de la altura de los camellones (CR) se relacionó en forma lineal negativa con la cantidad de material erosionado en todos los casos analizados, reflejando el

poder degradativo de las partículas transportadas. Nuevamente, se pudo comprobar que la altura inicial del camellón condicionó la degradación de la rugosidad, demostrando que los camellones de mayor altura fueron relativamente más estables.

Metodológicamente, este estudio se desarrolló en condiciones de campo, aunque varios parámetros pudieron ser perfectamente controlados por el uso de un simulador de lluvia (intensidad de las tormentas, tiempos de simulación, condiciones de la superficie del suelo comparables y con varias repeticiones) y de un túnel de viento (velocidad y dirección del viento constantes, condiciones de la superficie del suelo comparables y con varias repeticiones). Esta situación representó ciertas ventajas con respecto a las utilizadas en estudios anteriores, desarrollados en condiciones totalmente artificiales. Sin embargo, se pudieron detectar algunas limitaciones metodológicas como la falta de un estricto control de la humedad de los primeros centímetros del suelo. Aunque se intentó uniformar las condiciones en las cuales se ejecutaron los tratamientos, dejando que los suelos se secaran al aire antes de iniciar los mismos, se pudo detectar que esta variable es muy sensible y que incide enormemente en la tasa de erosión. En estudios futuros, será necesario controlarla con más exactitud.

Uno de los parámetros más afectados por la humedad de la superficie del suelo es la velocidad umbral del viento. Será necesario utilizar instrumentos que permitan el registro continuo de la humedad edáfica para poder definir con más precisión la erosionabilidad en diferentes suelos, distintas condiciones de rugosidad de la superficie y diferentes épocas del año.

Otra de las variables que deberá ser analizada con mayor detalle es la

altura de los camellones y su relación con la erosión ya que ante determinados valores se incrementó la erosión con respecto al suelo plano. Este efecto, posible producto del aumento de la turbulencia y la velocidad del viento en las partes elevadas de los camellones más altos, deberá ser evaluado más en detalle. Esto permitirá definir alturas críticas de camellones en cada suelo y lograr mayores eficiencias en el control de la erosión. También debe mencionarse que todos los estudios realizados se efectuaron para vientos perpendiculares a los camellones. Surge un interrogante acerca de la relación entre altura del surco, ángulo de incidencia del viento y erosión. Este tipo de estudio podría ser también base de una nueva línea de investigación.

Otro efecto poco desarrollado en este estudio, que aparenta tener importancia para el control de la erosión, es el que poseen las labranzas sobre los pseudo-agregados o *clods* que se forman en superficie al labrar subsuelos húmedos. Existe poca información sobre las condiciones de humedad bajo las cuales debe operar una determinada herramienta de labranza para formar *clods* y poco se sabe acerca de la estabilidad y persistencia de éstos, lo que definiría su eficiencia para controlar la erosión.

Un aspecto no cubierto por este estudio es el funcionamiento de los modelos predictivos de la erosión eólica disponibles, al incluir en los mismos las ecuaciones de degradación de la rugosidad por efecto de las lluvias, en particular de la RSPC. Algunas de las variables a incluir serían valores de velocidad umbral variables, altura de los camellones y mediciones de la erosión en valores relativos. Esto permitiría contar con parámetros más sencillos para ser utilizados en los modelos y presumiblemente mejorar las predicciones.

Los resultados obtenidos en este estudio se realizaron sobre los dos suelos mas representativos de la Región Semiárida Pampeana Central de Argentina. Será necesario validar estos resultados para otras regiones con distintos tipos de suelos.

En definitiva, los resultados obtenidos permiten concluir que los mayores esfuerzos para controlar la erosión en la región bajo estudio deberían concentrarse en todas las estaciones del año, excepto otoño. En estas estaciones será indispensable mantener los suelos con cierta rugosidad para evitar su erosión, principalmente en Ustipsammentes, que presentan mayor susceptibilidad a erosionarse que los Haplustoles. En invierno, primavera y verano, el control más eficiente de la erosión podrá ser logrado con labranzas que formen camellones de alturas intermedias. Los sistemas lister pueden incrementar la erosión, inclusive con respecto a suelos planos.

En otoño es posible utilizar labranzas que produzcan camellones de distintas alturas, aun cuando las elevadas precipitaciones que ocurren normalmente en esta época, causarán la degradación de la rugosidad no orientada y orientada del suelo.

5- Bibliografía

- Adema, E.O. 2000.** Erosión hídrica en dos suelos de pastizal bajo diferentes porcentajes de cobertura en la región del caldenal pampeano. Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. 102 pp.
- Aimar, S.B. 2002.** Estimaciones cualitativas y cuantitativas de pérdidas por erosión en suelos de la región semiárida pampeana central. Tesis Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. 143 pp.
- 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.
- Allmaras, R.R; R.E Burwell; W.E. Larson y R.F. Holt. 1966.** Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. USDA, Conservation Research Report. 7:22.
- Allmaras, R.R; R.E Burwell y R.F. Holt. 1967.** Plow-layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. Soil Sci. Soc. Am. J. 31:550-556.
- Allmaras, R.R; E.A. Hallauer; W.W. Nelson y S.E. Evans. 1977.** Surface energy balance and soil thermal property modifications by tillage-induced soil structure. Minn. Agric. Expt. Stn. Bull. 306, 41pp.
- Arika, C.L; J.M. Gregory y R. E. Borelli. 1986.** A ridge and clod wind erosion model. American Society of Agricultural Engineers. Paper N° 86-2531. Am. Soc. Agr.Eng., St. Joseph, Mich.
- Armbrust, D.V; W.S Chepil y F.H Siddoway. 1964.** Effects of ridges on erosion of soil by wind. Soil Sci. Soc. Am.Proc. 28 (4): 557- 560.
- 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 pp.

Belly, P.Y. 1964. Sand movement of wind. TM. No, US Army Coastal Engineering Research Center, Washington D. C. 80 pp.

Benites, J.R; D. Saintroint y K. Morimoto. 1994. Degradación de suelos y producción agrícola en la Argentina, Bolivia, Brasil, Chile y Paraguay. En: Erosión en suelos de América Latina, FAO, Santiago de Chile, Chile. 83-114.

Bennet, H.H; F.G. Bell y B.D. Robinson. 1951. Raindrops and erosion. USDA. Circ. N°895.

Bertuzzi, P.; G. Raws y D. Couralt. 1990. Testing roughness indices to estimate soil surface changes due to simulated rainfall. *Soil & Tillage Research.* 17: 87-99.

Bielders, C.; K. Michels; J.L. Rajot. 2000. On-farm evaluation of ridging and residue management practices to reduce wind erosion in Niger. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1776-1785.

Bisal, F y J. Hsieh. 1966. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Sci.* 102: 143-146.

Borselli, L. 1999. Segmentation of soil roughness profiles. *Earth Surface Processes and Landforms.* 24: 71-90.

Burwell, R.E y W.E. Larson. 1969. Infiltration as influenced by tillage-induced random roughness and pore space. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33(3): 449-452.

Buschiazzo, D.E. 2006. Management systems in southern South America. In:

Peterson, G.A., Unger, P.W., Payne, W.A., editors. Dryland Agriculture. American Society of Agronomy Monograph Series 23. Madison, WI: Am Soc Agr. 395-425.

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; S.B. Aimar; M. Zappa. 2000. Erosión eólica de un Haplustol Éntico cultivado con girasol en tres sistemas de labranza. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (en CD).Mar del Plata.

Buschiazzo, D.E y S.B. Aimar. 2003. Erosión eólica: procesos y predicción. En: Golberg, A. D. y A. G. Kin (2003). Viento, suelo y planta. INTA, 130 pp.

Buschiazzo, D.E.; S. Abascal; T. Zobeck. 2007. Wind erosion in tillage systems in the semiarid Pampa of Argentina. J Arid Environ. 69: 29-39.

Casagrande, G y Vergara, G. 1996. Características climáticas de la región. En: Labranzas en la región semiárida argentina. Buschiazzo, D.E; Panigatti, J y Babinec, F (eds). INTA, 11-17.

Chen, W.N. 1991. Wind tunnel simulation of soil erosion by wind. Acta Conservationis Soil et Aquae Sinica. 5: 33-40.

Chen, W.N; Z.B. Dong; Z.S. Li y Z.T. Yang. 1996. Wind tunnel test of the influence of moisture on the erodibility of loessial sandy loam soils by wind. J. Arid Environ. 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. 1953. Field structure of cultivated soils with special reference to erodibility by wind. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 17: 185-190.

- 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. 1961.** The uses of spheres to measure lift and drag on wind-eroded soil grains. Soil Sci. Soc. Am Proc 25: 243-245.
- Chepil, W.S y J.L. Doughty. 1939.** Wind tunnel experiments on soil drifting. Report Regional Commission on Soil Drifting, Swift Current. Saskatchewan. 19 pp.
- Chepil, W.S y R.A. Milne. 1941.** Wind erosion of soil in relation to roughness to surface. Soil Sci. 52: 417-433.
- Chepil, W.S. y N.P. Woodruff. 1954.** Estimations of wind erodibility of field surfaces. J. Soil Water Conserv. 9: 257-265, 285.
- Chepil, W.S y N.P. Woodruff. 1963.** The physics of wind erosion and its control. Advances in Agronomy 15: 211-302.
- Cogo, N.P. 1981.** Effect of residue cover, tillage-induced roughness, and slope length on erosion and related parameters. Ph. D. Dissertation. Purdue University, 344 pp.
- Cogo, N.P; W.C. Moldenhauer y G.R Foster. 1983.** Effect of crop residue, tillage-induced roughness and runoff velocity on size distribution of eroded soil aggregates. Soil Sci. Soc. Am. J. 47(5): 1005-1008.
- Cogo, N.P; W.C. Moldenhauer y G.R Foster. 1984.** Soil loss reductions from conservation tillage practices. Soil Sci. Soc. Am. J. 48: 368-373.
- Colvin, T.S; D.C. Erbach; W.F. Buchele y R.M. Cruse. 1984.** Tillage index on created soil conditions. Trans. Am. Soc.Agric. Eng. 27: 370-371.

- Cooke, R; A. Warren y A. Goudir. 1993.** Desert geomorphology. UCL Press. St. Ives. UK.
- Cornelis, W.M y D. Gabriels. 2003.** The effect of surface moisture on the entrainment of dune sand wind: an evaluation of select models. *Sedimentology*. 50: 771-790.
- Cornelis, W.M; D. Gabriels y R. Hartmann. 2004.** Parameterization for the threshold shear velocity to initiate deflation of dry and wet sediment. *Geomorphology*. 59: 1-4.
- Courault, J.D; P. Bertuzzi y M.C. Girard. 1993.** Monitoring surface changes of bare soils due to slaking using spectral measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 1595-1601.
- Covas, G. y A. Glave. 1996.** El deterioro del ambiente en la Argentina (suelo, agua y vegetación). Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura, Buenos Aires, Argentina. 109-114.
- Cruse, R.M; D.R. Linden; J.K. Radke; W.E. Larson y K. Larntz. 1980.** A model to predict tillage effects on soil temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 378-383.
- Currence, H.D y W.G. Lovely. 1970.** The analysis of soil surface roughness. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 13: 710-714.
- Darboux, F. C.H Huang. 2003.** An instantaneous-profile laser scanner to measure soil surface microtopography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 92-99.
- Dexter, A.R. 1977.** Effect of rainfall on the surface microrelief of tilled soil. *J. Terramech.* 14: 11-22.
- Dong, G.R.; C.Z. Li y J. Jin. 1987.** Several results about wind erosion from wind tunnel experiments. *Chin. Sci. Bull.* 32(2): 297-301.

- Dregne, H.E. 1986.** Desertification of arid lands. En: Physics of desertification. F. El-Baz and M. H. A. Hassan (eds). Dordrecht, The Netherlands: Martinus, Nijhoff.
- Eltz, F.L.F y L.D Norton. 1997.** Surface roughness changes as effected by rainfall erosivity, tillage and canopy cover. Soil sci. Soc. Am. J. 61(6): 1746-1755.
- FAO. 1979.** Food and Agriculture Organization, United Nations. A provisional methodology for soil degradation assessment. Rome, Italy.
- Fecan, F; B. Marticorena y G. Bergametti. 1999.** Parametrization of the increase of the eolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semiarid areas. Annales Geophysicae 17: 149-157.
- Foster, G.R; D.K McCool; K.G Renard y W.C Moldenhauer. 1981.** Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units. J. Soil Water Conserv. 36: 355-359.
- Fryrear, D.W. 1984.** Soil ridges-clods and wind erosion. Trans Am. Soc. Agric. Eng. 445-448.
- Fryrear, D.W. 1986.** A field dust sampler. J Soil Water Conserv. 41(2): 117-120.
- Fryrear, D.W. 1990.** Wind erosion: mechanics, prediction, and control. Adv. Soil Sci. 13: 187-199.
- Fryrear, D.W y D.V. Armbrust. 1969.** Cotton gin trash for wind erosion control. Texas Agricultural Experiment Station, MP 928. p 7.
- Fryrear, D.W. y E.L. Skidmore. 1985.** Methods of controlling wind erosion. In: Folleu, R y B.A. Stewart. (Eds). Soil erosion and crop productivity. ASA, CSSA, Madison, WI. 443-457.
- Fryrear, D.W; J.D Ali Saleh; H.M Bilbro; J.E Schomberg y T.M Zobeck.**

- 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.
- Fryrear, D.W; W. Chen y C. Lester. 1999.** Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. 10th International Soil Conservation Organization Conference. West Lafayette, Indiana, USA. 89 pp.
- Fryrear, D.W; P.L. Sutherland; G. Davis; G. Hardee y M. Dollar. 2001.** Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ. In: D.E. Stott; R.H. Mohtar y G.C. Steinhardt (eds). Sustaining the Global Farm. 760-765.
- Gabel, D. 1993.** Einfluss vulkanischer Asche und Nützung auf die Böden der semiariden Pampa Argentiniens. Diplomarbeit von D. Gabel Allgemeine Agrarwissenschaften. Universität Hohenheim. Stuttgart. pp 99.
- García Moreno, R; M.C. Díaz Alvarez; A. Tarquis Alonso; S. Barrington y A. Saa Requejo. 2008.** Tillage and soil type effects on soil surface roughness at semiarid climatic conditions. Soil and Tillage Research. 98: 35-44.
- Geiger, R. 1957.** The climate near the ground. Second Rev. Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass.
- Gillette, D.A. 1977.** Fine particulate emissions due to wind erosion. Trans Am. Soc. Agric. Eng. 20: 890-897.
- 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.
- Gillette, D.A y P.H. Stockton. 1986.** Mass momentum and kinetic energy fluxes of saltating particles. In Aeolian Geomorphology. Nickling, W.G.

(ed).Allen and Unwin: Boston. 35-56.

Ginoux, P.; I. Chin; I. Tegen; J. Prospero; B. Holben; O. Dubovik y S.J. Lin.

2001. Global simulation of dust in the troposphere: model description and assessment. J. Geophys. Res. D. 106: 20255-20274.

Greeley, R y J.D. Iversen. 1985. Wind as a geological process on Earth, Mars, Venus and Titan. Cambridge: Cambridge University Press.

Gregory, J.M y M.M Darwish. 1989. Threshold friction velocity prediction considering water content. Am. Soc. Agr. Eng. Proc. Paper N° 90-2562, New Orleans.

Gregory, J.M y M.M Darwish. 1990. Threshold friction velocity prediction considering water content. Am. Soc. Agr. Eng. St. Joseph, MI, USA. Paper No 902562.

Hagen, L.J. 1984. Soil aggregate abrasion by impacting sand and soil particles. Trans. Am. Soc. Agr. Eng. 27: 805- 808.

Hagen, L.J. 1988. New wind erosion model development in the USDA. In: Wind erosion conference Proceedings, Texas Tech. University, Lubbock.11-13 April.

Hagen, L.J. 1991. A wind erosion prediction system to meet users needs. J. Soil Water Conserv. 46: 106-111.

Hagen, L.J. 2001. Assessment of wind erosion parameters using wind tunnels. In: D.E Stott; R.H Mohtar y G.C Steinhardt (eds). Sustaining the Global Farm. 742-746.

Hagen, L.J; E.L. Skidmore y J.B. Layton. 1988. Wind erosion abrasion: effects of aggregate moisture. Trans. Am. Soc. Agr. Eng. 31(3): 725-728.

Hagen, L.J y D.V Armbrust. 1992. Aerodynamic roughness and saltation

- trapping efficiency of tillage ridges. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.* 35: 1179-1184.
- Hasi, E. 1997.** Preliminary study on the vertical distributions of wind dust over Bashang Plateau, Hebei province. *J. Desert Res.* 14(17): 9-14.
- He, W.Q.; W.S. Gao; S.B. Sui y P.Y. Zhao. 2004.** Study on some factors influencing soil erosion by wind tunnel experiment in north ecotone between agriculture and pasture. *J. Soil Erosion Soil Water Conserv.* 18 (2): 1-8.
- Helming, K; M.J. Römken y S.N Prasad. 1998.** Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flume study. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 243-250.
- Hevia, G.; M. Mendez y D.E. Buschiazzo. 2007.** Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion. *Geoderma.* 140(1–2): 90–96.
- Hudson, N. 1981.** Soil Conservation. Cornell University Press.
- Huszar, P.C y S.L Piper. 1986.** Estimating the off-site cost of wind erosion in New Mexico. *J. Soil Water Conserv.* 41: 414-416.
- INTA; Gob. de La Pampa; UNLPam. 1980.** Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. INTA, Buenos Aires 487 pp.
- Iversen, J.D; J.B. Pollack; R. Greenley y B.R. White. 1976.** Saltation threshold on Mars: the effect of interparticle force, surface roughness, and low atmospheric density. *Icarus.* 29: 319-393.
- Iversen, J.D y K.R Rasmussen. 1994.** The effects of surface slope on saltation threshold. *Sedimentology.* 41: 721-728.
- Jester , W y A. Klik. 2005.** Soil surface roughness measurement – methods, applicability and surface representation. *Catena.* 64: 174-192.

- Johnson, C.B; J.V Mannering y W.C Moldonhauer. 1979.** Influence of surface roughness and clod size and stability on soil and water losses. Soil Sci. Soc. Am. J. 43(4): 772-777.
- Kamphorst, E.C., V Jetten; J. Guérif; J. Pitkänen; B.V. Iversen; J.T Douglas y A. Paz. 2000.** Predicting depression storage from soil surface roughness. Soil Sci. Soc. Am. J.64: 1749-1758.
- Korcz, M.; J. Fudała y C. Kliś. 2009.** Estimation of wind blown dust emissions in Europe and its vicinity. Atmospheric Environment. 43(7): 1410-1420.
- Kuipers, I.I. 1957.** A relief meter for soil cumulative studies. Neth. J. Agric. Sci. 5: 225-242.
- Laften, J.M; J.L. Baker; R.O. Hartwing; W.F. Buchele y H.P. Johnson. 1978.** Soil and water loss from conservation tillage systems. Trans. Am. Soc. Agr. Eng. 21: 881-885.
- Lal, R. 1991.** Soil structure and sustainability. Journal of Sustainable Agriculture. 67-92.
- Lal, R. y D.M. Van Doren. 1990.** Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration for two soils in Ohio. Soil Tillage Res. 16: 71-84.
- Li, Z.S y J.R. Ni. 1998.** Aeolian sand transport processes. J. Arid Land Resour. Environ. 12(3): 89-97.
- Liu, M.X.; J.A. Wang; P.Yan; L.Y. Liu; Y.Q. Ge; X.Y. Li; X. Hu; Y. Song y L. Wang. 2006.** Wind tunnel simulation of ridge-tillage effects on soil erosion from cropland. Soil Tillage Res. 20(1-2): 242-249.
- Lopez, M.V; M. Sabre; R. Gracia; J.L. Aee.óe y L. Gomes. 1997.** Preliminary results of the effectiveness of conservation tillage on wind erosion control

in Aragon (NE Spain). Wind Erosion International Symposium/Workshop. Manhattan, Kansas, USA. 19 pp.

Lyles, L. 1985. Predicting and controlling wind erosion. *Agric. History*. 59(2): 205-214.

Lyles, L. 1988. Basic wind erosion processes. *Agric. Ecosystems Environ.* 22/23: 91-101.

Lyles, L.; L.A. Disrud y N.P Woodruff. 1969. Effects of soil physical properties, rainfall characteristics and wind velocity on clod disintegration by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 33(2): 302-306.

Lyles, L. y J. Tatarko. 1982. Emergency tillage to control wind erosion: Influences on winter wheat yields. *J. Soil Water Conserv.* 37(6): 344-347.

Lyles, L. y J. Tatarko. 1986. Wind erosion effects on soil texture and organic matter. *J. Soil Water Conserv.* 41(3): 191-193.

Lyles, L. y J. Tatarko. 1987. Precipitation effects on ridges created by a grain drill. *J. Soil Water Conserv.* 42(4): 269-271.

Mannering, J.V; L.D. Meyer y C.B Johnson. 1966. Infiltration and erosion as effected by minimum tillage for corn. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30: 101-105.

Marlatt, W.E y D.N. Hyder. 1970. Soil ridging for reduction of wind erosion from grass seedbeds. *J. Range Manage.* 23: 170-174.

Martínez-Mena, M.; R. Abadia; V. Castillo y J. Albaladejo. 2001. Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *Rev. C & G.* 15(1-2): 31-43.

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.

- McKenna-Neuman, C. 2003.** Effects of temperature and humidity upon the entrainment of sedimentary particles by wind. *Boundary-Layer Meteorology*. 108: 61-89.
- 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.
- Mendez, M. y D.E. Buschiazzo. 2008.** Canopy and residue cover effects on wind erosion of an Haplustoll in a semiarid environment of Argentina. *Soil Sci.* 173: 468-479.
- Merrill, S.D. 1998.** Comments on the chain method for measuring soil surface roughness: Use of the chain set. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1147-1149.
- Merrill, S.D.; C. Huang; T.M Zobeck Y D.L Tanaka. 2001.** Use of the chain set for scale-sensitive and erosion-relevant measurement of soil surface roughness. In: D.E Stott; R.H Mohtar y G.C Steinhardt (eds). *Sustaining the Global Farm*. 594-600.
- Moran, M.S; A. Vidal; D. Troufleau; Q.J. Clarke; P.J. Pinter; T.A. Mitchell y Y. Inoué. 1997.** Combining multifrequency microwave and optical data for crop management. *Remote Sens. Environ.* 61: 96-109.
- Namikas, S.L y D.J Sherman. 1995.** A review of the effects of surface moisture content on aeolian sand transport. In: Tchakerian, V.P (ed), *Desert Aeolian Processes*. Chapman y Hall, London. 269-293.
- Nelson, R.G.; L.E. Wagner y R. Stueve. 1993.** Mass Reduction of standing and flat crop residues by selected tillage implements. In: *Proc. ASAE Winter Meeting, Chicago, IL: Dec.14-17. Paper N° 932539.*
- Nicholson, S. 2000.** *Land Surface Processes and Sahel Climate, Rev.*

Geophys. 38 (1): 117–139.

Ojeniyi, S.O y A.R. Dexter. 1979. Soil factors affecting the macro-structures produced by tillage. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 6 pp.

Onstad, C.A. 1984. Effect of rainfall on tilled soil properties. *Am. Soc. Agric. Eng.* paper No. 84-2525. ASAE, St. Joseph, MI.

Onstad, C.A; M.L. Wolfe; C.L. Larson y D.C. Slack. 1984. Tilled soil subsidence during repeated wetting. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 27: 733-736.

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.

Potter, K.N; T.M Zobeck y L.J. Hagen. 1990. A microrelief index to estimate soil erodibility by wind. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 33: 151-155.

Powers, D.H y E.L. Skidmore. 1984. Soil structure as influenced by simulated tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 879-884.

Quiroga, A.R.; D.E. Buschiazzo y N. Peinemann. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Tillage Res.* 52: 21-28.

Ravi, S; P. D'Odorico; T.M Over y T.M Zobeck. 2004. On the effect of air

humidity on soil susceptibility to wind erosion: The case of air-dry soils. *Geophys. Res. Lett.* 31: L09501, 10.1029/2004GL019485.

Ravi, S. y P. D'Odorico. 2005. A field-scale analysis of the dependence of wind erosion threshold velocity on air humidity. *Geophys. Res Lett.*, 32, L21404, doi:10.1029/2005GL023675.

Ravi, S; T.M Zobeck; T.M Over; G.S Okin y P. D'Odorico. 2006. On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion. *Sedimentology.* 53: 597-609.

Robichaud, P.R y M. Molnau. 1990. Measuring soil roughness changes with an ultrasonic profiler. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 33(6): 1851-1858.

Römken, R.J.M y J.Y. Wang. 1985. Soil translocation by rainfall. *J. Miss. Acad. Sci.* 30: 9-21.

Römken, R.J.M y J.Y Wang. 1986. Effect of tillage on surface roughness. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 29: 429-433.

Rostagno, C.M. y D. Garayzar. 1995. Diseño de un simulador de lluvia para estudios de infiltración y erosión de suelos. *Ciencia del Suelo.* 13: 41-43.

Saleh, A. 1993. Soil roughness measurement: Chain method. *J. Soil Water Conserv.* 48(6): 527-529.

Saleh, A. 1994. Measuring and predicting ridge-orientation effect on soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58(4): 1228-1230.

Saleh, A. 1997. Soil surface roughness measurement: A comparison study. *Agronomy Abstracts*, p. 271.

Saleh, A. 1998. Soil surface roughness decay by rainfall amount and erosivity index (EI). 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.

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 wind erosion equation (RWEQ). Citado por: Fryrear et al., 1998.

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.

Sano, E.E; A.R. Heate; D. Troufleau; M.S Moran y A. Vidal. 1998. Relation between ERS-1 synthetic aperture radar data and measurements of soil surface roughness and moisture content of rocky soils in a semiarid rangeland. *Water Resour. Res.* 34: 1491-1498.

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.

Shao, Y. 2000. Physics and modeling of wind erosion. Atmospheric and Oceanographic Sci. Library, vol. 23. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht.

Sokolik, I. y O.B. Toon. 1996. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosols. *Nature.* 381: 681-683.

- Steichen, J.M. 1984.** Infiltration and random roughness of a tilled and untilled clay pan soil. *Soil Tillage Res.* 4(3): 251-262.
- Sterk, G y W.P Spaan. 1997.** Wind erosion control with crop residue. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 911-917.
- Stockton, P.H. y D.A. Gillette. 1990.** Field measurement of the sheltering effect of vegetation on erodible land surfaces. *Land Degrad. Rehab.* 2: 77-85.
- Stout, J.E. 1998.** Effect of averaging time on the apparent threshold for aeolian transport. *J. Arid Environ.* 39: 395-401.
- Stout, J.E. 2003.** Intermittent Wind Erosion Activity in Burned Semiarid Grassland. 99th Annual Meeting of the Association of American Geographers, New Orleans, LA. 2003.
- Stout, J.E. 2004.** A method for establishing the critical threshold for aeolian transport in the field. *Earth Surfaces Processes and Landforms.* 29: 1195-1207.
- Stout, J.E y T.M. Zobeck. 1996.** The Wolfforth field experiment: a wind erosion study. *Soil Sci.* 161(9): 616-632.
- Stout, J.E y T.M. Zobeck. 1997.** Intermittent saltation. *Sedimentology.* 44: 959-970.
- Tegen, I. y I.J. Fung. 1995.** Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *J. Geophys. Res.* 100: 18707-18726.
- Tiessen, H.; W.B. Stewart y J.O. Moir. 1983.** Changes in organic and inorganic phosphorus composition of two grassland soils and their particle size fractions during 60 to 90 years of cultivation. *J. Soil Sci.* 34: 815-823.

- UNESCO-FAO. 1963.** Bioclimatic map of the mediterranean zone. Arid Zone Research XXI: 60.
- USDA- Agricultural Research Service. 1961.** A universal equation for measuring wind erosion. USDA- ARS. 22-69.
- USDA. 1978.** Predicting Rainfall erosion losses. Agriculture Handbook No537.
- Van Donk, S.J y Skidmore E.L. 2003.** Measurement and simulation of wind erosion, roughness degradation and residue decomposition on and agricultural field. Earth Surfaces Processes Landforms. 28: 1243-1258.
- Vidal Vázquez, E.; J.G Vivas Miranda y A. Paz González. 2005.** Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. Ecolog. Model. 182: 337-353.
- Visser, S.M.; G. Sterk y D. Karszenberg. 2005.** Wind erosion modelling in a Sahelian environment. Environmental Modelling & Software. 20(1): 69-84.
- Wagner, L. 2004.** The Wind Erosion Prediction System (WEPS). Wind Erosion Research Unit, USDA-ARS, Manhattan, Kansas, USA.
- Warner, W. S. 1995.** Mapping a three-dimensional soil surface with handheld 35 mm photography. Soil Tillage Res. 34: 187-197.
- Wegmann, H; D. Rieke-Zapp y S. Folke. 2001.** Digital photogrammetry for measuring soil surface roughness. Proc. ASPRS. Annual Conference, St. Louis, MO, USA.
- Welch, R.T; T.R Jordan y A.W Thomas. 1984.** A photogrammetric technique for measuring soil erosion. J. Soil Water Conserv. 39: 191-194.
- Woodruff, N.P y F.H Siddoway. 1965.** A wind erosion equation. Soil Sci. Am. Proc. 29(5): 602-608.

- Woodruff, N.P.; B.L. Schmidt; E.L. Skidmore; J.D. Dickerson; R.L. Meeker y L.M. Feusner. 1968.** A study of wind erosion in northwestern Ohio. Mimeographed Report. 55 pp.
- Wu, Z. 1987.** Aeolian Geomorphology. Sci. Press, Beijing.
- Yongliang Tian, B. 1988.** Wind erosion: threshold velocity for initial particle movement. Thesis in Agricultural engineering, Faculty of Texas Tech University. 69 pp.
- Zhang, H.; F.R Li; T.H. Zhang; Y. Shirato y Y.L. Li. 2002.** Wind sand flow structure and its variation under different surface condition in Korqin sandy land. J. Soil Water Conserv. 16(2): 20-28.
- Zhang, C.L; X.Y. Zou; J.R. Gong; L.Y. Lui y Y.Z. Lui. 2004.** Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel. Soil Tillage Res. 75: 53-59.
- Zingg, A.W. 1953.** Wind tunnel studies if the movement of sedimentary material. Proc. 5 th Hidraulic Conf. Bull. 34: 111-135.
- Zingg, A.W. y N.P Woodruff. 1951.** Calibration of a portable tunnel for simple determination of roughness and drag on field surfaces. Agron. J. 43(4): 191-193.
- Zobeck, T.M. 1991.** Soil properties effecting wind erosion. J. Soil Water Conserv. 46: 112- 118.
- Zobeck, T.M y C.A Onstad. 1987.** Tillage and rainfall effects on random roughness: A review. Soil Tillage. Res. 9: 1-20.
- Zobeck, T.M y T.W. Popham. 1997.** Modification of the wind erosion roughness index by rainfall. Soil Tillage Res. 42: 47-61.
- Zobeck, T.M y T.W. Popham. 2001.** Cropping and tillage effects on soil

roughness indexes. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 44(6): 1527-1536.

Zobeck, T.M.; G. Sterk; R. Funk; J.L. Rajot; J. Stout y S. Van Pelt. 2003.

Measurement and data analysis methods for field-scale wind erosion studies and model validation. *Earth Surface Processes and Landforms.* 28: 1163-1188.

ANEXO

A-1

K' en función de la rugosidad no orientada (C_{rr}) y rugosidad orientada (K_r).

L ₂ †		40	39.6	39.2	38.8	38.4	38.0	37.6	37.2	36.8	36.4	36.0	35.6	35.2	34.8	34.4	34.0	33.6	33.2	32.8
C _{rr} *		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
K _r **		----- K' -----																		
inch	cm																			
0	0	1.00	0.88	0.78	0.69	0.61	0.54	0.48	0.42	0.37	0.33	0.29	0.26	0.23	0.20	0.18	0.16	0.14	0.12	0.11
1	2.5	0.36	0.31	0.28	0.25	0.22	0.19	0.17	0.15	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04
2	5.1	0.21	0.19	0.17	0.15	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02
3	7.6	0.15	0.13	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
4	10.2	0.12	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
5	12.7	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
6	15.2	0.10	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
7	17.8	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
8	20.3	0.09	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
9	22.9	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
10	25.4	0.11	0.10	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
11	27.9	0.12	0.11	0.10	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
12	30.5	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

A-2

Ejemplo de la hoja de cálculo para estimar el transporte de masa en cada punto de muestreo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	P	Altura (m)	Masa (kg m ⁻²)	1/raíz masa	Masa calc.	Intersección	Pendiente	f0	Sigma	f0*sigma	Transporte (kg m ⁻¹)
2											
3		0,135	1,571	0,798	0,594						
4	Norte	0,5	0,143	2,641	0,261	1,053	1,811	0,902	0,581	0,524	0,4
5		1,5	0,078	3,587	0,070						

P: posición del colector, **1/raíz masa:** 1/RAIZ(C), **Masa calculada:** $H^4 \cdot (1 + B^3 / H^4)^{-2}$, **Intersección:** INTERSECCION EJE(D3:D5;B3:B5), **Pendiente:** PENDIENTE(D3:D5;B3:B5), **f0:** 1/F4^2, **Sigma:** (F4/G4), **Transporte** $H^4 \cdot I^4 \cdot (1 - (1 / (1 + (1.5 / I))))$.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Posición	Transporte (kg m ⁻¹)		Mayor valor Norte-Sur	Mayor valor Este-Oeste	Menor valor Norte-Sur	Menor valor Este-Oeste	Mat. Erosionado (kg ha ⁻¹)
2								
3	Norte	0,4						
4	Este	0,1		2,9	1,9	0,4	0,1	430,0
5	Oeste	1,9						
6	Sur	2,9						

Mayor valor Norte-Sur= SI(B3>B6;B3;B6), **Mayor valor Este-Oeste=** SI(B4>B5;B4;B5), **Menor valor Este-Oeste=** SI(B3<B6;B3;B6), **Menor valor Este-Oeste=** SI(B4<B5;B4;B5), **Material Erosionado=** ((D4+E4)-(F4+G4))*100.

A-3

Resultados de las simulaciones de lluvia para evaluar la degradación de la rugosidad no orientada (RRR) de la rastra (T1), lister (T2) y sembradora (T3), en el Haplustol éntico.

Tratamiento	Tiempo	Humedad original suelo	Crr prom. Antes	Crr prom. despues	RRR medido	RRR modelo	CUMR	CUMEI	% degradacion de Kr inic
T3	40	5,4	1,9	0,92	0,4842	0,8540	25,80	259,6259	51,58
T3	40	1,05	0,78	0,28	0,3590	0,8508	26,10	266,0470	64,10
T3	40	1,01	0,72	0,26	0,3611	0,8617	25,00	244,4063	63,89
T3	40	0,73	0,64	0,32	0,5000	0,8594	25,20	248,9894	50,00
T3	40	0,7	0,72	0,32	0,4444	0,8548	25,70	257,9496	55,56
T3	10	3,24	0,46	0,34	0,7391	0,9535	7,10	78,8513	26,09
T3	10	1,78	0,84	0,58	0,6905	0,9620	6,40	63,7359	30,95
T3	10	1,81	0,62	0,42	0,6774	0,9616	6,40	64,4033	32,26
T3	10	1,09	0,56	0,38	0,6786	0,9561	6,90	74,1118	32,14
T3	10	5,15	1,02	0,76	0,7451	0,9701	5,60	49,3453	25,49
T2	40	11,65	1,20	0,78	0,6500	0,8588	25,3	249,9774	35,00
T2	40	6,41	1,30	0,76	0,5846	0,8947	21,5	180,4826	41,54
T2	40	4,48	1,14	0,58	0,5088	0,8179	29,2	333,4249	49,12
T2	40	2,66	1,06	0,44	0,4151	0,8901	22	189,2682	58,49
T2	40	2,59	0,78	0,46	0,5897	0,9132	19,3	145,9138	41,03
T2	10	1,33	0,58	0,40	0,6897	0,9537	7,1	78,4811	31,03
T2	10	2,12	0,60	0,38	0,6333	0,9523	7,2	81,0881	36,67
T2	10	2,17	0,60	0,38	0,6333	0,9581	6,7	70,5663	36,67
T2	10	3,41	0,50	0,38	0,7600	0,9549	7	76,2808	24,00
T2	10	6,74	1,48	0,86	0,5811	0,9559	6,9	74,4716	41,89
T1	40	8,09	1,42	0,72	0,5070	0,8798	23,100	208,9693	49,30
T1	40	5,29	1,44	0,64	0,4444	0,8798	23,100	208,9693	55,56
T1	40	4,94	1,12	0,52	0,4643	0,8779	23,300	212,6009	53,57
T1	40	6,48	1,7	0,74	0,4353	0,8644	24,700	238,8977	56,47
T1	40	6,25	1,32	0,66	0,5000	0,8749	23,600	218,4145	50,00
T1	10	8,42	1,1	0,60	0,5455	0,9674	5,900	54,1422	45,45
T1	10	9,99	0,94	0,40	0,4255	0,9684	5,800	52,3173	57,45
T1	10	7,07	0,98	0,60	0,6122	0,9453	7,700	93,6006	38,78
T1	10	4,43	1,06	0,66	0,6226	0,9523	7,200	81,0833	37,74
T1	10	3,89	0,98	0,54	0,5510	0,9167	9,700	146,5042	44,90

A-4

Resultados de las simulaciones de lluvia para evaluar la degradación de la rugosidad orientada (ORR) de la rastra (T1), lister (T2) y sembradora (T3), en el Haplustol éntico.

Tratamiento	Tiempo	Humedad original suelo	Kr (antes ppt.)	Kr prom.	ORR medido	ORR modelo	CUMR	CUMEI	% degradacion de Kr inic
T3	40	5,4	2,9225	2,2960	0,7856	0,8871	25,20	248,3324	21,44
T3	40	1,05	2,9225	2,2597	0,7732	0,8856	25,80	259,6259	22,68
T3	40	1,01	2,9225	2,1638	0,7404	0,8848	26,10	266,0470	25,96
T3	40	0,73	2,9225	2,2265	0,7619	0,8870	25,20	248,9894	23,81
T3	40	0,7	2,9225	1,8543	0,6345	0,8858	25,70	257,9496	36,55
T3	10	3,24	2,9225	2,5705	0,8796	0,9260	7,10	78,8513	12,04
T3	10	1,78	2,9225	2,4166	0,8269	0,9304	6,40	63,7359	17,31
T3	10	1,81	2,9225	2,4353	0,8333	0,9303	6,40	64,4033	16,67
T3	10	1,09	2,9225	2,4918	0,8526	0,9273	6,90	74,1118	14,74
T3	10	5,15	2,9225	2,3932	0,8189	0,9355	5,60	49,3453	18,11
T2	40	11,65	25,40	23,520	0,9260	0,8969	21,5	180,4826	7,40
T2	40	6,41	25,40	23,620	0,9299	0,8861	25,6	255,6111	7,01
T2	40	4,48	25,40	23,798	0,9369	0,8772	29,2	333,4249	6,31
T2	40	2,66	25,40	23,572	0,9280	0,8955	22	189,2682	7,20
T2	40	2,59	25,40	23,763	0,9356	0,9030	19,3	145,9138	6,44
T2	10	1,33	25,40	24,878	0,9794	0,9261	7,1	78,4811	2,06
T2	10	2,12	25,40	24,898	0,9802	0,9254	7,2	81,0881	1,98
T2	10	2,17	25,40	24,743	0,9741	0,9284	6,7	70,5663	2,59
T2	10	3,41	25,40	24,903	0,9804	0,9267	7	76,2808	1,96
T2	10	6,74	25,40	24,717	0,9731	0,9272	6,9	74,4716	2,69
T1	40	8,09	0,846	2,54	0,21175	0,8925	23,100	208,9693	78,82
T1	40	5,29	0,846	2,54	0,36712	0,8925	23,100	208,9693	63,29
T1	40	4,94	0,846	2,54	0,47780	0,8920	23,300	212,6009	52,22
T1	40	6,48	0,846	2,54	0,42778	0,8883	24,700	238,8977	57,22
T1	40	6,25	0,846	2,54	0,54780	0,8911	23,600	218,4145	45,22
T1	10	8,42	0,846	2,54	0,62968	0,9337	5,900	54,1422	37,03
T1	10	9,99	0,846	2,54	0,61484	0,9344	5,800	52,3173	38,52
T1	10	7,07	0,846	2,54	0,64622	0,9222	7,700	93,6006	35,38
T1	10	4,43	0,846	2,54	0,62979	0,9254	7,200	81,0833	37,02
T1	10	3,89	0,846	2,54	0,71770	0,9113	9,700	146,5042	28,23

A-5

Resultados de las simulaciones de lluvia para evaluar la degradación de la rugosidad no orientada (RRR) de la rastra (T1), lister (T2) y sembradora (T3), en el Ustipsamment típico.

Tratamiento	Tiempo	Humedad original suelo	Crr (antes ppt.)	Crr prom.	RRR medido	RRR modelo	CUMR	CUMEI	% degradacion de Crr inic
T3	40	5,35	0,660	0,280	0,4242	0,7932	30,00	352,73	57,58
T3	40	5,02	0,580	0,220	0,3793	0,8224	27,50	296,09	62,07
T3	40	6,73	0,520	0,160	0,3077	0,8330	26,60	276,00	69,23
T3	40	6,74	0,580	0,240	0,4138	0,8205	27,70	299,69	58,62
T3	40	5,97	0,580	0,200	0,3448	0,7740	31,60	391,31	65,52
T3	10	3,16	0,480	0,240	0,5000	0,9175	9,20	132,63	50,00
T3	10	4,93	0,540	0,300	0,5556	0,9482	7,20	80,71	44,44
T3	10	3,46	0,560	0,280	0,5000	0,9318	8,30	108,19	50,00
T3	10	2,5	0,460	0,240	0,5217	0,9381	7,90	97,62	47,83
T3	10	4,39	0,520	0,280	0,5385	0,9478	7,20	81,46	46,15
T2	40	8,34	0,880	0,360	0,4091	0,7926	30,10	353,9029	59,09
T2	40	8,78	1,220	0,300	0,2459	0,8282	27,00	285,0755	75,41
T2	40	8,93	1,180	0,380	0,3220	0,8240	27,40	292,8704	67,80
T2	40	8,72	1,180	0,240	0,2034	0,8339	26,50	274,2694	79,66
T2	40	5,46	1,160	0,180	0,1552	0,7803	31,10	378,6329	84,48
T2	10	9,53	1,060	0,620	0,5849	0,9494	7,10	78,8513	41,51
T2	10	8,77	1,140	0,800	0,7018	0,9452	7,40	85,6556	29,82
T2	10	6,69	0,840	0,440	0,5238	0,9436	7,61	88,3773	47,62
T2	10	5,55	0,980	0,680	0,6939	0,9424	7,60	90,3482	30,61
T2	10	6,96	0,900	0,580	0,6444	0,9287	8,5	113,4566	35,56
T1	40	6,1	0,560	0,2000	0,35714	0,8361	26,30	270,1426	64,29
T1	40	6,0	0,520	0,1800	0,34615	0,8214	27,60	297,8862	65,38
T1	40	6,6	0,500	0,1400	0,28000	0,7837	30,80	371,7686	72,00
T1	40	5,7	0,500	0,1200	0,24000	0,7993	29,50	340,6958	76,00
T1	40	4,7	0,580	0,1800	0,31034	0,8282	27,00	285,0755	68,97
T1	10	5,8	0,580	0,3000	0,51724	0,9424	7,60	90,3482	48,28
T1	10	4,7	0,520	0,2600	0,50000	0,9318	8,30	108,1905	50,00
T1	10	5,0	0,540	0,3000	0,55556	0,9469	7,30	82,9756	44,44
T1	10	5,5	0,520	0,2800	0,53846	0,9436	7,50	88,3773	46,15
T1	10	4,2	0,520	0,2800	0,53846	0,9466	7,30	83,3562	46,15

A-6

Resultados de las simulaciones de lluvia para evaluar la degradación de la rugosidad orientada (ORR) de la rastra (T1), lister (T2) y sembradora (T3), en el Ustipsamment típico.

Tratamiento	Tiempo	Humedad original suelo	Kr (antes ppt.)	Kr prom.	ORR medido	ORR modelo	CUMR	CUMEI	% degradacion de Kr inic.
T3	40	5,35	2,9225	1,5391	0,5266	0,8646	30,00	352,7271	47,34
T3	40	5,02	2,9225	1,5896	0,5439	0,8771	25,30	250,6370	45,61
T3	40	6,73	2,9225	1,5009	0,5136	0,8711	27,50	296,0900	48,64
T3	40	6,74	2,9225	1,2798	0,4379	0,8736	26,60	275,9979	56,21
T3	40	5,97	2,9225	1,2929	0,4424	0,8707	27,70	299,6877	55,76
T3	10	3,16	2,9225	2,1307	0,7291	0,9064	9,20	132,6337	27,09
T3	10	4,93	2,9225	2,0595	0,7047	0,9117	8,30	108,1905	29,53
T3	10	3,46	2,9225	2,063	0,7059	0,9076	9,00	126,7002	29,41
T3	10	2,5	2,9225	2,1302	0,7289	0,9143	7,90	97,6217	27,11
T3	10	4,39	2,9225	2,0740	0,7097	0,9187	7,20	81,4635	29,03
T2	40	8,34	25,40	20,282	0,7985	0,8645	30,10	353,9029	20,15
T2	40	8,78	25,40	18,989	0,7476	0,8715	27,40	292,8704	25,24
T2	40	8,93	25,40	17,147	0,6751	0,8739	26,50	274,2694	32,49
T2	40	8,72	25,40	17,361	0,6835	0,8619	31,10	378,6329	31,65
T2	40	5,46	25,40	18,181	0,7158	0,8694	28,20	310,2434	28,42
T2	10	9,53	25,40	21,990	0,8658	0,9195	7,10	78,8513	13,42
T2	10	8,77	25,40	21,964	0,8647	0,9175	7,40	85,6556	13,53
T2	10	6,69	25,40	22,320	0,8787	0,9168	7,50	88,3773	12,13
T2	10	5,55	25,40	21,980	0,8654	0,9162	7,60	90,3482	13,46
T2	10	6,96	25,40	22,542	0,8875	0,9105	8,5	113,4566	11,25
T1	40	6,1	0,85	0,3801	0,4493	0,8693	28,200	310,9786	55,07
T1	40	6,0	0,85	0,3596	0,42504	0,8744	26,300	270,1426	57,50
T1	40	6,6	0,85	0,3940	0,46561	0,8709	27,600	297,8862	53,44
T1	40	5,7	0,85	0,3447	0,40738	0,8626	30,800	371,7686	59,26
T1	40	4,7	0,85	0,3464	0,40938	0,8659	29,500	340,6958	59,06
T1	10	5,8	0,85	0,5493	0,64919	0,9117	8,300	108,1905	35,08
T1	10	4,7	0,85	0,5444	0,64342	0,9131	8,100	102,2048	35,66
T1	10	5,0	0,85	0,5491	0,64902	0,9183	7,300	82,9756	35,10
T1	10	5,5	0,85	0,5178	0,61200	0,9168	7,500	88,3773	38,80
T1	10	4,2	0,85	0,5169	0,61089	0,9182	7,300	83,3562	38,91

A-7

Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Ustipsamment típico para rastra (T1).

Fecha	Tiempo min	RPM	Tratamiento	Rugosidad Orientada inicial		Kr inic	Rugosidad Orientada		Kr final	Kr prom. final	Cantidad material (gr)	CR	Tasa relativa (TU/ test.gr)	Crr y Kr	K' (Tabla)
				Altura surco (cm)	Espaciamento (cm)		Altura surco (cm)	Espaciamento (cm)							
18/12/2007	3	3000	T1	2,1	30,0	0,85	2,1	30,0	0,59	0,594	6,358	0,702	0,622	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,15	30,0	0,62					0,85	
"	"		"	"	"		"	2,1	30,5					0,58	
18/12/2007	3	3000	T1	2,1	30,0	0,85	1,95	30,0	0,51	0,580	6,536	0,686	0,639	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,1	30,0	0,59					0,85	
"	"		"	"	"		"	2,2	30,0					0,65	
18/12/2007	3	3000	T1	2,1	30,5	0,85	2,1	30,5	0,58	0,600	6,323	0,709	0,618	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,15	30,5	0,61					0,85	
"	"		"	"	"		"	2,15	30,0					0,62	
18/12/2007	3	3000	T1	2,1	30,0	0,85	2,15	30,0	0,62	0,601	5,962	0,710	0,583	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,10	30,0	0,59					0,85	
"	"		"	"	"		2,1	29,5	0,60						
18/12/2007	3	2100	T1	2,3	30,0	0,85	2,3	30,0	0,71	0,708	0,960	0,837	0,308	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,3	31,0	0,68					0,85	
"	"		"	"	"		2,35	30,0	0,74						
18/12/2007	3	2100	T1	2,3	30,0	0,85	2,3	30,0	0,71	0,733	0,879	0,866	0,282	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,35	30,5	0,72					0,85	
"	"		"	"	"		2,4	30,0	0,77						
18/12/2007	3	2100	T1	2,3	30,0	0,85	2,3	30,0	0,71	0,747	0,808	0,883	0,259	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,4	30,0	0,77					0,85	
"	"		"	"	"		2,4	30,0	0,77						
18/12/2007	3	2100	T1	2,3	30,0	0,85	2,35	30,0	0,74	0,706	0,874	0,834	0,280	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,3	30,0	0,71					0,85	
"	"		"	"	"		2,25	30,0	0,68						
18/12/2007	3	1400	T1	2,4	30,0	0,85	2,4	30,0	0,77	0,790	0,075	0,933	0,077	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,4	30,0	0,77					0,85	
"	"		"	"	"		2,5	30,0	0,83						
18/12/2007	3	1400	T1	2,4	30,0	0,85	2,4	30,0	0,77	0,796	0,091	0,941	0,093	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,45	30,5	0,79					0,85	
"	"		"	"	"		2,5	30,0	0,83						
18/12/2007	3	1400	T1	2,4	30,0	0,85	2,4	30,0	0,77	0,790	0,061	0,933	0,062	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,45	30,0	0,80					0,85	
"	"		"	"	"		2,45	30,0	0,80						
18/12/2007	3	1400	T1	2,4	31,0	0,85	2,4	31,0	0,74	0,773	0,077	0,913	0,078	0,530	0,731
"	"		"	2,54	30,5		2,4	30,5	0,76					0,85	
"	"		"	"	"		2,5	30,5	0,82						
02/01/2008	3	3000	T1-40	1,66	31,58	0,35	0,2	30,0	0,01	0,008	10,808	0,024	1,057	0,530	0,852
"	"		"	"	"		0,25	31,0	0,01					0,35	
"	"		"	"	"		0,30	30,0	0,01						
02/01/2008	3	3000	T1-40	1,66	31,58	0,35	0,3	31,0	0,01	0,011	10,646	0,032	1,041	0,530	0,852
"	"		"	"	"		0,2	31,0	0,01					0,35	
"	"		"	"	"		0,35	30,0	0,02						
02/01/2008	3	3000	T1-40	1,66	31,58	0,35	0,3	30,5	0,01	0,012	10,499	0,036	1,027	0,530	0,852
"	"		"	"	"		0,20	31,0	0,01					0,35	
"	"		"	"	"		0,40	31,2	0,02						
02/01/2008	3	3000	T1-40	1,66	31,58	0,35	0,20	31,0	0,01	0,008	10,740	0,024	1,051	0,530	0,852
"	"		"	"	"		0,25	31,0	0,01					0,35	
"	"		"	"	"		0,3	31,0	0,01						
03/01/2008	3	2100	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,1	31,5	0,15	0,166	2,580	0,474	0,827	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,2	31,0	0,19					0,35	
"	"		"	"	"		1,1	31,0	0,16						
03/01/2008	3	2100	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,2	31,0	0,19	0,176	2,211	0,503	0,709	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,1	31,2	0,16					0,35	
"	"		"	"	"		1,2	31,0	0,19						
03/01/2008	3	2100	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,15	31,0	0,17	0,181	2,447	0,518	0,784	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,2	31,0	0,19					0,35	
"	"		"	"	"		1,2	31,0	0,19						
03/01/2008	3	2100	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,25	31,0	0,20	0,190	1,938	0,545	0,621	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,2	31,5	0,18					0,35	
"	"		"	"	"		1,2	31,0	0,19						
03/01/2008	3	2100	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,2	31,0	0,19	0,185	2,098	0,531	0,672	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,2	31,0	0,19					0,35	
"	"		"	"	"		1,2	31,3	0,18						
03/01/2008	3	1400	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,5	31,5	0,29	0,301	0,554	0,864	0,565	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,6	31,2	0,33					0,35	
"	"		"	"	"		1,5	31	0,29						
03/01/2008	3	1400	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,5	31	0,29	0,295	0,465	0,846	0,475	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,55	31,5	0,31					0,35	
"	"		"	"	"		1,5	31	0,29						
03/01/2008	3	1400	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,6	31	0,33	0,316	0,442	0,906	0,451	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,6	31	0,33					0,35	
"	"		"	"	"		1,5	31,2	0,29						
03/01/2008	3	1400	T1-40	1,66	31,58	0,35	1,6	31	0,33	0,310	0,493	0,889	0,504	0,530	0,852
"	"		"	"	"		1,55	31	0,31					0,35	
"	"		"	"	"		1,5	31	0,29						
04/01/2008	3	3000	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,4	31	0,25	0,235	7,863	0,444	0,769	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,3	31	0,22					0,53	
"	"		"	"	"		1,35	31	0,24						
04/01/2008	3	3000	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,35	31,5	0,23	0,231	8,098	0,436	0,792	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,35	31,5	0,25					0,53	
"	"		"	"	"		1,35	31,5	0,23						
04/01/2008	3	3000	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,3	31,5	0,21	0,232	8,177	0,437	0,800	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,4	31,5	0,25					0,53	
"	"		"	"	"		1,35	31,5	0,23						
04/01/2008	3	3000	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,3	31,5	0,21	0,230	8,103	0,435	0,793	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,35	32	0,23					0,53	
"	"		"	"	"		1,4	31,5	0,25						
04/01/2008	3	2100	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,7	31,5	0,37	0,353	1,889	0,666	0,605	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,7	31,5	0,37					0,53	
"	"		"	"	"		1,6	31,5	0,33						
04/01/2008	3	2100	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,6	31,7	0,32	0,325	2,137	0,612	0,685	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,6	31,4	0,33					0,53	
"	"		"	"	"		1,6	31,5	0,33						
04/01/2008	3	2100	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,7	31,5	0,37	0,353	2,111	0,665	0,677	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,7	31,5	0,37					0,53	
"	"		"	"	"		1,6	31,6	0,32						
04/01/2008	3	2100	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,7	31,6	0,37	0,352	1,953	0,663	0,626	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,65	31,7	0,34					0,53	
"	"		"	"	"		1,65	31,5	0,35						
04/01/2008	3	1400	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,9	31,5	0,46	0,467	0,491	0,880	0,501	0,530	0,808
"	"		"	"	"		1,95	31,5	0,48					0,53	
"	"		"	"	"		1,9	31,5	0,46						
04/01/2008	3	1400	T1-10	2,02	30,78	0,53	1,85	31,6	0,43	0,450	0,573	0,849	0,585	0,530	

A-8

Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Ustipsamment típico para Lister (T2).

Fecha	Tiempo min	RPM	Tratamiento	Rugosidad Orientada inicial		Kr inic	Rugosidad Orientada		Kr final	Kr prom. Final	Cantidad material (gr)	CR	Taco relativa (T2/Test, gr)	Crr y Kr	K' (Tabla)
				Altura surco (cm)	Espaciamiento (cm)		Altura surco (cm)	Espaciamiento (cm)							
13/12/2007	3	3000	T2	25,4	101,6	25,40	23,5	99,0	22,31	22,043	4,732	0,868	0,463	1,050 25,4	0,099
"	"		23,5				103,0	21,45							
"	"		24,0				103,0	22,37							
13/12/2007	3	3000	T2	25,4	101,6	25,40	23,5	102,0	21,66	21,937	3,987	0,864	0,390	1,050 25,4	0,099
"	"		23,5				103,5	21,34							
"	"		24,0				101,0	22,81							
13/12/2007	3	3000	T2	25,4	101,6	25,40	24,0	102,0	22,59	21,697	4,376	0,854	0,428	1,050 25,4	0,099
"	"		23,5				102,0	21,66							
"	"		23,0				101,5	20,85							
13/12/2007	3	3000	T2	25,4	101,6	25,40	24,0	101,5	22,70	22,082	4,037	0,869	0,395	1,050 25,4	0,099
"	"		24,0				101,5	22,70							
"	"		23,0				101,5	20,85							
13/12/2007	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	102,0	24,51	24,424	0,549	0,962	0,176	1,050 25,4	0,099
"	"		24,5				100,0	24,01							
"	"		25,0				101,0	24,75							
13/12/2007	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	102,0	24,51	24,386	0,543	0,960	0,174	1,050 25,4	0,099
"	"		24,5				101,0	23,77							
"	"		25,0				100,5	24,88							
13/12/2007	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	102,0	24,51	24,225	0,537	0,954	0,172	1,050 25,4	0,099
"	"		24,5				101,5	23,66							
"	"		25,0				102,0	24,51							
13/12/2007	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	102,0	24,51	24,384	0,574	0,960	0,184	1,050 25,4	0,099
"	"		24,5				100,5	23,89							
"	"		25,0				101,0	24,75							
13/12/2007	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	101,5	24,63	24,098	0,526	0,949	0,168	1,050 25,4	0,099
"	"		24,5				100,5	23,89							
"	"		24,5				101,0	23,77							
13/12/2007	3	1400	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	102,0	24,51	24,672	0,157	0,971	0,160	1,050 25,4	0,099
"	"		25,0				101,0	24,75							
"	"		25,0				101,0	24,75							
13/12/2007	3	1400	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	102,0	24,51	24,591	0,184	0,968	0,187	1,050 25,4	0,099
"	"		25,0				101,0	24,75							
"	"		25,0				102,0	24,51							
13/12/2007	3	1400	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	102,0	24,51	24,500	0,189	0,965	0,193	1,050 25,4	0,099
"	"		25,0				101,0	24,75							
"	"		24,8				101,5	24,24							
13/12/2007	3	1400	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	100,5	24,88	24,428	0,164	0,962	0,168	1,050 25,4	0,099
"	"		24,5				101,5	23,66							
"	"		25,0				101,0	24,75							
08/01/2008	3	3000	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	18,0	103,0	12,58	12,777	9,625	0,684	0,941	1,050 18,67	0,080
"	"		18,0				103,5	12,52							
"	"		18,5				103,5	13,23							
08/01/2008	3	3000	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	18,5	103,3	13,25	12,786	9,791	0,685	0,958	1,050 18,67	0,080
"	"		18,0				103,0	12,58							
"	"		18,0				103,5	12,52							
08/01/2008	3	3000	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	18,0	103,0	12,58	12,789	9,997	0,685	0,978	1,050 18,67	0,080
"	"		18,5				103,5	13,23							
"	"		18,0				103,2	12,56							
08/01/2008	3	3000	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	18,0	103,0	12,58	12,819	9,375	0,686	0,917	1,050 18,67	0,080
"	"		18,0				103,0	12,58							
"	"		18,5				103,0	13,29							
08/01/2008	3	2100	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	21,0	103,0	17,13	16,563	1,242	0,887	0,398	1,050 18,67	0,080
"	"		20,5				103,5	16,24							
"	"		20,5				103,0	16,32							
08/01/2008	3	2100	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	21,0	103,0	17,13	16,589	1,322	0,888	0,424	1,050 18,67	0,080
"	"		20,5				103,0	16,32							
"	"		20,5				103,0	16,32							
08/01/2008	3	2100	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	21,0	103,0	17,13	16,473	1,511	0,882	0,484	1,050 18,67	0,080
"	"		20,0				103,5	15,46							
"	"		20,8				102,8	16,83							
08/01/2008	3	2100	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	21,0	103,0	17,13	16,589	1,223	0,888	0,392	1,050 18,67	0,080
"	"		20,5				103,0	16,32							
"	"		20,5				103,0	16,32							
08/01/2008	3	1400	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	21,5	103,0	17,95	17,852	0,514	0,956	0,525	1,050 18,67	0,080
"	"		21,5				103,0	17,95							
"	"		21,3				102,8	17,65							
08/01/2008	3	1400	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	21,2	103,0	17,45	17,730	0,697	0,949	0,712	1,050 18,67	0,080
"	"		21,5				103,0	17,95							
"	"		21,4				103,0	17,78							
08/01/2008	3	1400	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	21,5	103,0	17,95	17,896	0,665	0,958	0,679	1,050 18,67	0,080
"	"		21,4				103,0	17,78							
"	"		21,5				103,0	17,95							
08/01/2008	3	1400	T2 - 40	21,95	103,2	18,67	21,4	103,0	17,78	17,928	0,453	0,960	0,462	1,050 18,67	0,080
"	"		21,5				103,0	17,95							
"	"		21,6				103,4	18,05							
09/01/2008	3	3000	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	21,5	101,0	18,31	18,026	6,070	0,808	0,594	1,050 22,32	0,088
"	"		21				101,0	17,47							
"	"		21,5				101,0	18,31							
09/01/2008	3	3000	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	22,0	101,0	19,17	18,314	6,000	0,821	0,587	1,050 22,32	0,088
"	"		21,0				101,0	17,47							
"	"		21,5				101,0	18,31							
09/01/2008	3	3000	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	21,0	100,8	17,50	18,369	5,552	0,823	0,543	1,050 22,32	0,088
"	"		21,5				100,8	18,34							
"	"		22				100,5	19,26							
09/01/2008	3	3000	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	21,5	101,2	18,27	18,043	6,210	0,808	0,607	1,050 22,32	0,088
"	"		21,5				101,0	18,31							
"	"		21				100,5	17,55							
09/01/2008	3	2100	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	23,0	101,2	20,91	20,691	0,989	0,927	0,317	1,050 22,32	0,088
"	"		22,5				100,7	20,11							
"	"		23				100,5	21,05							
09/01/2008	3	2100	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	23,0	100,5	21,05	20,438	1,100	0,916	0,353	1,050 22,32	0,088
"	"		22,5				100,5	20,11							
"	"		22,5				100,7	20,11							
09/01/2008	3	2100	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	22,5	100,5	20,15	20,753	0,934	0,930	0,299	1,050 22,32	0,088
"	"		23				100,5	21,05							
"	"		23				100,5	21,05							
09/01/2008	3	2100	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	22,5	100,7	20,11	20,618	1,029	0,924	0,330	1,050 22,32	0,088
"	"		22,8				100,5	20,69							
"	"		23				100,5	21,05							
09/01/2008	3	1400	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	23,2	100,5	21,42	21,794	0,377	0,977	0,385	1,050 22,32	0,088
"	"		23,5				100,5	21,98							
"	"		23,5				100,5	21,98							
09/01/2008	3	1400	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	23,6	100,5	22,17	22,036	0,416	0,987	0,424	1,050 22,32	0,088
"	"		23,4				100,5	21,79							
"	"		23,6				100,6	22,15							
09/01/2008	3	1400	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	23,4	100,5	21,79	21,980	0,374	0,985	0,382	1,050 22,32	0,088
"	"		23,5				100,5	21,98							
"	"		23,6				100,5	22,17							
09/01/2008	3	1400	T2 - 10	23,83	101,78	22,32	23,3	100,5	21,61	21,904	0,360	0,981	0,368	1,050 22,32	0,088
"	"		23,6				100,5	22,17							
"	"		23,5				100,7	21,94							

A-9

Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Ustipsammet típico para Sembradora (T3).

Fecha	Tiempo min	RPM	Tratamiento	Rugosidad Orientada inicial		K _r inic	Rugosidad Orientada		K _r final	K _r prom. Final	Cantidad material (gr)	CR	Tasa relativa (T3/Test, gr)	C _{rr} y K _r	K' (Tabla)
				Altura surco (cm)	espaciamento (cm)		Altura surco (cm)	espaciamento (cm)							
20/12/2007	3	3000	T3	5,1	35,6	2,92	4,3	35,5	2,08	2,172	4,489	0,743	0,439	0,550	0,311
"	"		4,5				35,5	2,28							
"	"		4,4				36,0	2,15							
20/12/2007	3	3000	T3	5,1	35,6	2,92	4,3	35,5	2,08	2,132	4,840	0,730	0,473	0,550	0,311
"	"		4,4				35,5	2,18							
"	"		4,35				35,5	2,13							
20/12/2007	3	3000	T3	5,1	35,6	2,92	4,2	36,0	1,96	2,075	5,044	0,710	0,493	0,550	0,311
"	"		4,4				35,5	2,18							
"	"		4,3				35,5	2,08							
20/12/2007	3	3000	T3	5,1	35,6	2,92	4,3	35,5	2,08	2,074	4,571	0,710	0,447	0,550	0,311
"	"		4,3				35,5	2,08							
"	"		4,3				36,0	2,05							
20/12/2007	3	2100	T3	5,1	35,6	2,92	4,8	35,5	2,60	2,490	0,645	0,852	0,207	0,550	0,311
"	"		4,6				35,5	2,38							
"	"		4,7				35,5	2,49							
20/12/2007	3	2100	T3	5,1	35,6	2,92	4,6	35,5	2,38	2,455	0,604	0,840	0,194	0,550	0,311
"	"		4,6				35,5	2,38							
"	"		4,8				35,5	2,60							
20/12/2007	3	2100	T3	5,1	35,6	2,92	4,7	35,5	2,49	2,443	0,632	0,836	0,203	0,550	0,311
"	"		4,6				36,0	2,35							
"	"		4,7				35,5	2,49							
20/12/2007	3	2100	T3	5,1	35,6	2,92	4,6	35,5	2,38	2,455	0,538	0,840	0,172	0,550	0,311
"	"		4,6				35,5	2,38							
"	"		4,8				35,5	2,60							
20/12/2007	3	1400	T3	5,1	35,6	2,92	4,9	35,5	2,71	2,743	0,060	0,938	0,062	0,550	0,311
"	"		4,9				35,5	2,71							
"	"		5,0				35,5	2,82							
20/12/2007	3	1400	T3	5,1	35,6	2,92	5,0	35,5	2,82	2,781	0,049	0,952	0,050	0,550	0,311
"	"		4,8				36,0	2,60							
"	"		5,1				35,5	2,93							
20/12/2007	3	1400	T3	5,1	35,6	2,92	4,9	35,5	2,71	2,743	0,073	0,938	0,074	0,550	0,311
"	"		4,9				35,5	2,71							
"	"		5,0				35,5	2,82							
20/12/2007	3	1400	T3	5,1	35,6	2,92	5,0	35,5	2,82	2,718	0,090	0,930	0,092	0,550	0,311
"	"		4,8				36,0	2,56							
"	"		5,0				36,0	2,78							
09/01/2008	3	3000	T3-40	3,68	36,78	1,47	2,0	37,5	0,43	0,434	8,066	0,295	0,789	0,550	0,580
"	"		2,0				36,5	0,44							
"	"		2,0				36,5	0,44							
09/01/2008	3	3000	T3-40	3,68	36,78	1,47	2,1	36,5	0,48	0,453	7,844	0,307	0,767	0,550	0,580
"	"		2,0				36,7	0,44							
"	"		2,0				36,5	0,44							
09/01/2008	3	3000	T3-40	3,68	36,78	1,47	2,15	37,0	0,50	0,445	8,085	0,302	0,791	0,550	0,580
"	"		2,0				36,5	0,44							
"	"		1,9				36,5	0,40							
09/01/2008	3	3000	T3-40	3,68	36,78	1,47	2,1	36,5	0,48	0,468	7,985	0,318	0,781	0,550	0,580
"	"		2,1				36,5	0,48							
"	"		2,0				36,5	0,44							
11/01/2008	3	2100	T3-40	3,68	36,78	1,47	2,9	36,5	0,92	0,858	1,077	0,583	0,345	0,550	0,580
"	"		2,7				36,7	0,79							
"	"		2,8				36,5	0,86							
11/01/2008	3	2100	T3-40	3,68	36,78	1,47	2,80	36,5	0,86	0,859	1,033	0,583	0,331	0,550	0,580
"	"		2,8				36,5	0,86							
"	"		2,8				36,5	0,86							
11/01/2008	3	2100	T3-40	3,68	36,78	1,47	2,75	36,5	0,83	0,849	1,327	0,576	0,425	0,550	0,580
"	"		2,7				36,5	0,80							
"	"		2,9				36,6	0,92							
11/01/2008	3	2100	T3-40	3,68	36,78	1,47	2,8	36,5	0,86	0,827	1,365	0,562	0,438	0,550	0,580
"	"		2,75				36,5	0,83							
"	"		2,7				36,7	0,79							
11/01/2008	3	1400	T3-40	3,68	36,78	1,47	3,2	36,7	1,12	1,138	0,294	0,773	0,300	0,550	0,580
"	"		3,2				37,0	1,11							
"	"		3,3				36,6	1,19							
11/01/2008	3	1400	T3-40	3,68	36,78	1,47	3,2	36,5	1,12	1,144	0,270	0,777	0,276	0,550	0,580
"	"		3,2				36,7	1,12							
"	"		3,3				36,5	1,19							
11/01/2008	3	1400	T3-40	3,68	36,78	1,47	3,2	36,5	1,12	1,144	0,303	0,777	0,309	0,550	0,580
"	"		3,3				36,7	1,19							
"	"		3,2				36,5	1,12							
11/01/2008	3	1400	T3-40	3,68	36,78	1,47	3,2	36,5	1,12	1,144	0,291	0,777	0,297	0,550	0,580
"	"		3,2				36,6	1,12							
"	"		3,3				36,6	1,19							
11/01/2008	3	3000	T3-10	4,38	36,6	2,10	3,2	36,5	1,12	1,149	6,850	0,548	0,670	0,550	0,429
"	"		3,0				36,6	0,98							
"	"		3,5				36,5	1,34							
11/01/2008	3	3000	T3-10	4,38	36,6	2,10	3,1	36,5	1,05	1,196	6,317	0,571	0,618	0,550	0,429
"	"		3,3				36,5	1,19							
"	"		3,5				36,5	1,34							
11/01/2008	3	3000	T3-10	4,38	36,6	2,10	3,3	36,5	1,19	1,194	6,595	0,570	0,645	0,550	0,429
"	"		3,2				36,5	1,12							
"	"		3,4				36,5	1,27							
11/01/2008	3	3000	T3-10	4,38	36,6	2,10	3,3	36,5	1,19	1,193	6,140	0,569	0,601	0,550	0,429
"	"		3,3				36,5	1,19							
"	"		3,3				36,5	1,19							
12/01/2008	3	2100	T3-10	4,38	36,6	2,10	3,8	36,6	1,58	1,577	0,784	0,752	0,251	0,550	0,429
"	"		3,8				36,7	1,57							
"	"		3,8				36,6	1,58							
12/01/2008	3	2100	T3-10	4,38	36,6	2,10	3,6	36,5	1,42	1,526	0,829	0,728	0,266	0,550	0,429
"	"		3,8				36,6	1,58							
"	"		3,8				36,6	1,58							
12/01/2008	3	2100	T3-10	4,38	36,6	2,10	3,7	36,5	1,50	1,495	0,847	0,713	0,271	0,550	0,429
"	"		3,7				36,7	1,49							
"	"		3,7				36,7	1,49							
12/01/2008	3	2100	T3-10	4,38	36,6	2,10	3,6	36,4	1,42	1,499	0,826	0,715	0,265	0,550	0,429
"	"		3,7				36,5	1,50							
"	"		3,8				36,7	1,57							
11/01/2008	3	1400	T3-10	4,38	36,6	2,10	4,3	36,5	2,03	1,844	0,096	0,880	0,098	0,550	0,429
"	"		4,0				36,5	1,75							
"	"		4,0				36,5	1,75							
11/01/2008	3	1400	T3-10	4,38	36,6	2,10	4,1	36,5	1,84	1,842	0,083	0,879	0,085	0,550	0,429
"	"		4,1				36,5	1,84							
"	"		4,1				36,5	1,84							
11/01/2008	3	1400	T3-10	4,38	36,6	2,10	4,2	36,5	1,93	1,871	0,106	0,893	0,108	0,550	0,429
"	"		4,2				36,6	1,93							
"	"		4,0				36,5	1,75							
11/01/2008	3	1400	T3-10	4,38	36,6	2,10	4,1	36,5	1,84	1,813	0,132	0,865	0,135	0,550	0,429
"	"		4,0				36,5	1,75							
"	"		4,1				36,5	1,84							

A-10

Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Ustipsammet típico para la parcela de referencia (testigo).

Fecha	Tiempo min	RPM	Tratamiento	Rugosidad Natural		Crr inic	Crr inic prom	Crr final	Crr final prom	Cantidad material (gr)	Tasa relativa
				L ₂ inic	L ₂ final						
28/08/2007	3	3000	Test	99,5	99,7	0,50	0,43	0,30	0,23	9,840	0,962
"	"		"	99,5	99,8	0,50		0,20			
"	"		"	99,7	99,8	0,30		0,20			
28/08/2007	3	3000	Test	99,7	99,9	0,30	0,37	0,10	0,13	9,619	0,941
"	"		"	99,7	99,8	0,30		0,20			
"	"		"	99,5	99,9	0,50		0,10			
28/08/2007	3	3000	Test	99,7	99,8	0,30	0,37	0,20	0,10	11,152	1,091
"	"		"	99,6	99,9	0,40		0,10			
"	"		"	99,6	100	0,40		0,00			
28/08/2007	3	3000	Test	99,5	100	0,50	0,33	0,00	0,03	11,169	1,092
"	"		"	99,7	99,9	0,30		0,10			
"	"		"	99,8	100	0,20		0,00			
28/08/2007	3	3000	Test	99,8	99,7	0,20	0,23	0,30	0,20	9,338	0,913
"	"		"	99,8	99,8	0,20		0,20			
"	"		"	99,7	99,9	0,30		0,10			
28/08/2007	3	2100	Test	99,6	99,8	0,40	0,47	0,20	0,23	3,324	1,065
"	"		"	99,5	99,8	0,50		0,20			
"	"		"	99,5	99,7	0,50		0,30			
28/08/2007	3	2100	Test	99,6	99,8	0,40	0,40	0,20	0,17	2,975	0,953
"	"		"	99,5	99,8	0,50		0,20			
"	"		"	99,7	99,9	0,30		0,10			
06/09/2007	3	2100	Test	99,5	99,7	0,50	0,50	0,30	0,33	3,029	0,971
"	"		"	99,5	99,6	0,50		0,40			
"	"		"	99,5	99,7	0,50		0,30			
06/09/2007	3	2100	Test	99,6	99,9	0,4	0,43	0,1	0,20	3,083	0,988
"	"		"	99,5	99,8	0,5		0,2			
"	"		"	99,6	99,7	0,4		0,3			
06/09/2007	3	2100	Test	99,7	99,8	0,3	0,37	0,2	0,23	3,310	1,061
"	"		"	99,5	99,7	0,5		0,3			
"	"		"	99,7	99,8	0,3		0,2			
06/09/2007	3	1400	Test	99,7	99,8	0,3	0,33	0,2	0,20	0,924	0,943
"	"		"	99,6	99,8	0,4		0,2			
"	"		"	99,7	99,8	0,3		0,2			
06/09/2007	3	1400	Test	99,6	99,8	0,4	0,33	0,2	0,20	1,009	1,029
"	"		"	99,7	99,8	0,3		0,2			
"	"		"	99,7	99,8	0,3		0,2			
06/09/2007	3	1400	Test	99,8	99,8	0,2	0,27	0,2	0,20	0,918	0,938
"	"		"	99,7	99,8	0,3		0,2			
"	"		"	99,7	99,8	0,3		0,2			
06/09/2007	3	1400	Test	99,7	99,8	0,3	0,33	0,2	0,23	1,032	1,053
"	"		"	99,7	99,7	0,3		0,3			
"	"		"	99,6	99,8	0,4		0,2			
06/09/2007	3	1400	Test	99,6	99,8	0,4	0,37	0,2	0,23	1,015	1,037
"	"		"	99,6	99,8	0,4		0,2			
"	"		"	99,7	99,7	0,3		0,3			

A-11

Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Haplustol éntico para rastra (T1).

Fecha	Tiempo min	RPM	Tratamiento	Rugosidad Orientada inicial		Kr inic	Rugosidad Orientada		Kr final	Kr prom. final	Cantidad material (gr)	CR	Tasa relativa (T1/est, gr)	Crr y Kr	K' (Tabla)	
				Altura surco (cm)	Espaciamento (cm)		Altura surco (cm)	Espaciamento (cm)								
14/07/2008	3	1400	T1	2,54	30,5	0,85	2,5	30,5	0,82	0,809	0,033	0,956	0,077	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,50	30,5					0,82		0,85
"	"		"				"	2,45	30,5					0,79		0,85
14/07/2008	3	1400	T1	2,54	30,5	0,85	2,5	30,5	0,82	0,820	0,034	0,969	0,081	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,5	30,5					0,82		0,85
"	"		"				"	2,5	30,5					0,82		0,85
14/07/2008	3	1400	T1	2,54	30,5	0,85	2,45	30,5	0,79	0,808	0,043	0,955	0,101	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,5	30,5					0,82		0,85
"	"		"				"	2,5	30,6					0,82		0,85
14/07/2008	3	1400	T1	2,54	30,5	0,85	2,4	30,4	0,76	0,793	0,034	0,937	0,079	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,5	30,6					0,84		0,85
"	"		"				"	2,5	30,6					0,78		0,85
14/07/2008	3	2100	T1	2,54	30,5	0,85	2,4	30,5	0,76	0,765	0,824	0,904	0,327	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,4	30,5					0,76		0,85
"	"		"				"	2,45	30,6					0,78		0,85
14/07/2008	3	2100	T1	2,54	30,5	0,85	2,4	30,5	0,76	0,744	0,830	0,880	0,329	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,4	30,6					0,75		0,85
"	"		"				"	2,35	30,5					0,72		0,85
14/07/2008	3	2100	T1	2,54	30,5	0,85	2,4	30,5	0,76	0,755	0,766	0,893	0,304	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,4	30,5					0,76		0,85
"	"		"				"	2,4	30,5					0,76		0,85
14/07/2008	3	2100	T1	2,54	30,5	0,85	2,4	30,5	0,76	0,733	0,896	0,867	0,355	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,4	30,6					0,75		0,85
"	"		"				"	2,3	30,6					0,69		0,85
15/07/2008	3	3000	T1	2,54	30,5	0,85	2,2	30,5	0,63	0,615	3,395	0,726	0,423	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,2	30,6					0,63		0,85
"	"		"				"	2,1	30,6					0,58		0,85
15/07/2008	3	3000	T1	2,54	30,5	0,85	2,20	30,6	0,63	0,625	3,158	0,738	0,393	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,2	30,5					0,63		0,85
"	"		"				"	2,15	30,5					0,61		0,85
15/07/2008	3	3000	T1	2,54	30,5	0,85	2,15	30,5	0,61	0,606	3,417	0,717	0,425	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,2	30,5					0,63		0,85
"	"		"				"	2,1	30,5					0,58		0,85
15/07/2008	3	3000	T1	2,54	30,5	0,85	2,2	30,6	0,63	0,615	3,048	0,726	0,380	1,210	0,673	
"	"		"				"	2,2	30,6					0,63		0,85
"	"		"				"	2,1	30,5					0,58		0,85
16/07/2008	3	1400	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,9	31,6	0,46	0,490	0,066	0,896	0,155	1,210	0,737	
"	"		"				"	2,0	31,5					0,51		0,55
"	"		"				"	2,0	31,7					0,50		0,55
16/07/2008	3	1400	T1-10	2,08	31,66	0,55	2,0	31,7	0,50	0,490	0,071	0,897	0,168	1,210	0,737	
"	"		"				"	1,9	31,5					0,46		0,55
"	"		"				"	2,0	31,5					0,51		0,55
16/07/2008	3	1400	T1-10	2,08	31,66	0,55	2,0	31,7	0,50	0,506	0,072	0,925	0,170	1,210	0,737	
"	"		"				"	2,0	31,6					0,51		0,55
"	"		"				"	2,0	31,6					0,51		0,55
16/07/2008	3	1400	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,9	31,5	0,46	0,482	0,075	0,882	0,177	1,210	0,737	
"	"		"				"	2,0	31,7					0,50		0,55
"	"		"				"	2,0	31,5					0,48		0,55
16/07/2008	3	2100	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,8	31,5	0,41	0,443	0,929	0,811	0,368	1,210	0,737	
"	"		"				"	2,0	31,5					0,51		0,55
"	"		"				"	1,8	31,6					0,41		0,55
16/07/2008	3	2100	T1-10	2,08	31,66	0,55	2,0	31,5	0,51	0,444	0,970	0,812	0,384	1,210	0,737	
"	"		"				"	1,8	31,5					0,41		0,55
"	"		"				"	1,8	31,5					0,41		0,55
16/07/2008	3	2100	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,8	31,5	0,41	0,443	1,034	0,810	0,410	1,210	0,737	
"	"		"				"	1,9	31,5					0,46		0,55
"	"		"				"	1,9	31,5					0,46		0,55
16/07/2008	3	2100	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,9	31,4	0,46	0,451	1,029	0,825	0,408	1,210	0,737	
"	"		"				"	1,9	31,5					0,46		0,55
"	"		"				"	1,85	31,5					0,43		0,55
12/08/2008	3	3000	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,5	31,5	0,29	0,279	4,298	0,511	0,535	1,210	0,737	
"	"		"				"	1,45	31,5					0,27		0,55
"	"		"				"	1,5	31,5					0,29		0,55
12/08/2008	3	3000	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,5	31,5	0,29	0,286	4,176	0,523	0,520	1,210	0,737	
"	"		"				"	1,5	31,5					0,29		0,55
"	"		"				"	1,5	31,5					0,29		0,55
12/08/2008	3	3000	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,4	31,5	0,25	0,286	4,032	0,523	0,502	1,210	0,737	
"	"		"				"	1,55	31,5					0,31		0,55
"	"		"				"	1,55	31,6					0,30		0,55
12/08/2008	3	3000	T1-10	2,08	31,66	0,55	1,4	31,5	0,25	0,273	4,117	0,500	0,513	1,210	0,737	
"	"		"				"	1,5	31,5					0,29		0,55
"	"		"				"	1,5	31,5					0,29		0,55
14/08/2008	3	1400	T1-40	1,75	32,26	0,38	1,7	32,2	0,36	0,338	0,102	0,891	0,241	1,210	0,775	
"	"		"				"	1,65	32,2					0,34		0,38
"	"		"				"	1,6	32,2					0,32		0,38
14/08/2008	3	1400	T1-40	1,75	32,26	0,38	1,7	32,2	0,36	0,338	0,140	0,890	0,329	1,210	0,775	
"	"		"				"	1,6	32,2					0,32		0,38
"	"		"				"	1,65	32,3					0,34		0,38
14/08/2008	3	1400	T1-40	1,75	32,26	0,38	1,6	32,2	0,32	0,331	0,124	0,873	0,292	1,210	0,775	
"	"		"				"	1,6	32,3					0,32		0,38
"	"		"				"	1,7	32,2					0,36		0,38
14/08/2008	3	1400	T1-40	1,75	32,26	0,38	1,7	32,3	0,36	0,338	0,125	0,889	0,295	1,210	0,775	
"	"		"				"	1,6	32,3					0,32		0,38
"	"		"				"	1,65	32,2					0,34		0,38
21/08/2008	3	2100	T1-40	1,75	32,26	0,38	1,4	32,2	0,24	0,238	1,833	0,626	0,726	1,210	0,775	
"	"		"				"	1,4	32,2					0,24		0,38
"	"		"				"	1,35	32,3					0,23		0,38
21/08/2008	3	2100	T1-40	1,75	32,26	0,38	1,4	32,3	0,24	0,243	1,543	0,641	0,611	1,210	0,775	
"	"		"				"	1,4	32,1					0,24		0,38
"	"		"				"	1,4	32,2					0,24		0,38
21/08/2008	3	2100	T1-40	1,75	32,26	0,38	1,4	32,2	0,24	0,249	1,396	0,657	0,553	1,210	0,775	
"	"		"				"	1,4	32,3					0,24		0,38
"	"		"				"	1,45	32,1					0,26		0,38
21/08/2008	3	2100	T1-40	1,75	32,26	0,38	1,4	32,5	0,24	0,237	1,673	0,624	0,663	1,210	0,775	
"	"		"				"	1,35	32,2					0,23		0,38
"	"		"				"	1,4	32,2					0,24		0,38
22/08/2008	3	3000	T1-40	1,75	32,26	0,38	0,85	32,5	0,09	0,093	5,009	0,245	0,624	1,210	0,775	
"	"		"				"	0,9	32,5					0,10		0,38
"	"		"				"	0,85	32,1					0,09		0,38
22/08/2008	3	3000	T1-40	1,75	32,26	0,38	0,9	32,2	0,10	0,097	4,643	0,255	0,578	1,210	0,775	
"	"		"				"	0,9	32,3					0,10		0,38
"	"		"				"	0,85	32,2					0,09		0,38
22/08/2008	3	3000	T1-40	1,75	32,26	0,38	0,8	32,5	0,08	0,082	5,301	0,217	0,660	1,210	0,775	
"	"		"				"	0,8	32,3					0,08		0,38
"	"															

A-12

Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Haplustol éntico para lister (T2).

Fecha	Tiempo min	RPM	Tratamiento	Rugosidad Orientada Inicial		Kr inic	Rugosidad Orientada		Kr final	Kr prom. final	Cantidad material (gr)	CR	Tasa relativa (T2/test, gr)	Crr y Kr	K' (Tabla)
				Altura surco (cm)	Espaciamiento (cm)		Altura surco (cm)	Espaciamiento (cm)							
09/10/2008	3	1400	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	101,5	24,63	24,704	0,236	0,973	0,556	0,920 25,40	0,101
"	"		25,0				101,4	24,65							
"	"		25,1				101,5	24,83							
09/10/2008	3	1400	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	101,5	24,63	24,704	0,254	0,973	0,598	0,920 25,40	0,101
"	"		25,0				101,0	24,75							
"	"		25,0				101,1	24,73							
09/10/2008	3	1400	T2	25,4	101,6	25,40	25,1	101,5	24,83	24,803	0,159	0,976	0,375	0,920 25,40	0,101
"	"		25,0				101,0	24,75							
"	"		25,1				101,5	24,83							
09/10/2008	3	1400	T2	25,4	101,6	25,40	25,0	101,5	24,63	24,705	0,257	0,973	0,606	0,920 25,40	0,101
"	"		25,1				101,4	24,85							
"	"		25,0				101,5	24,63							
09/10/2008	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	24,2	101,5	23,08	23,271	1,812	0,916	0,718	0,920 25,40	0,101
"	"		24,3				101,5	23,27							
"	"		24,4				101,5	23,46							
09/10/2008	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	24,3	101,7	23,22	23,255	1,939	0,916	0,768	0,920 25,40	0,101
"	"		24,3				101,5	23,27							
"	"		24,3				101,5	23,27							
09/10/2008	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	24,1	101,5	22,89	23,136	2,061	0,911	0,817	0,920 25,40	0,101
"	"		24,3				101,5	23,27							
"	"		24,3				101,6	23,25							
10/10/2008	3	2100	T2	25,4	101,6	25,40	24,4	101,5	23,46	23,088	2,179	0,909	0,863	0,920 25,40	0,101
"	"		24,2				101,4	23,10							
"	"		24,0				101,5	22,70							
10/10/2008	3	3000	T2	25,4	101,6	25,40	23,2	101,5	21,21	21,395	6,217	0,842	0,774	0,920 25,40	0,101
"	"		23,4				101,5	21,58							
"	"		23,3				101,5	21,39							
10/10/2008	3	3000	T2	25,4	101,6	25,40	23,2	102,0	21,11	21,203	6,133	0,835	0,764	0,920 25,40	0,101
"	"		23,3				101,5	21,39							
"	"		23,2				102,0	21,11							
10/10/2008	3	3000	T2	25,4	101,6	25,40	23,2	101,5	21,21	21,226	6,117	0,836	0,762	0,920 25,40	0,101
"	"		23,3				101,3	21,44							
"	"		23,1				101,5	21,03							
10/10/2008	3	3000	T2	25,4	101,6	25,40	23,2	101,3	21,25	21,226	6,192	0,836	0,771	0,920 25,40	0,101
"	"		23,3				101,5	21,39							
"	"		23,1				101,5	21,03							
10/10/2008	3	1400	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	24,6	101,5	23,85	23,857	0,425	0,961	1,002	0,920 24,82	0,099
"	"		24,5				101,5	23,66							
"	"		24,7				101,4	24,07							
10/10/2008	3	1400	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	24,5	101,5	23,66	23,792	0,430	0,958	1,014	0,920 24,82	0,099
"	"		24,7				101,5	24,04							
"	"		24,5				101,4	23,68							
10/10/2008	3	1400	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	24,5	101,6	23,63	23,784	0,414	0,958	0,977	0,920 24,82	0,099
"	"		24,6				101,4	23,87							
"	"		24,6				101,5	23,85							
10/10/2008	3	1400	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	24,4	101,6	23,44	23,712	0,415	0,955	0,977	0,920 24,82	0,099
"	"		24,6				101,5	23,85							
"	"		24,6				101,5	23,85							
10/10/2008	3	2100	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	23,8	101,5	22,32	22,308	3,091	0,899	1,225	0,920 24,82	0,099
"	"		23,8				101,7	22,28							
"	"		23,8				101,5	22,32							
05/11/2008	3	2100	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	23,8	101,5	22,32	22,162	3,080	0,893	1,220	0,920 24,82	0,099
"	"		23,8				102,0	22,21							
"	"		23,6				101,5	21,95							
05/11/2008	3	2100	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	23,8	101,5	22,32	22,315	3,048	0,899	1,207	0,920 24,82	0,099
"	"		23,8				101,5	22,32							
"	"		23,8				101,6	22,30							
05/11/2008	3	2100	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	23,4	101,5	21,58	22,075	2,889	0,889	1,144	0,920 24,82	0,099
"	"		23,8				101,5	22,32							
"	"		23,8				101,5	22,32							
05/11/2008	3	3000	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	22,5	101,5	19,95	19,658	7,925	0,792	0,987	0,920 24,82	0,099
"	"		22,0				101,5	19,07							
"	"		22,5				101,5	19,95							
06/11/2008	3	3000	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	22,5	101,5	19,95	20,056	7,142	0,808	0,889	0,920 24,82	0,099
"	"		22,7				101,5	20,31							
"	"		22,5				101,7	19,91							
06/11/2008	3	3000	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	22,5	101,5	19,95	19,614	7,944	0,790	0,989	0,920 24,82	0,099
"	"		22,5				101,7	19,91							
"	"		22,0				102,0	18,98							
06/11/2008	3	3000	T2 - 10	25,09	101,44	24,82	22,0	101,5	19,07	19,764	7,728	0,796	0,962	0,920 24,82	0,099
"	"		22,5				101,7	19,91							
"	"		22,7				101,5	20,31							
06/11/2008	3	1400	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	23,1	101,5	21,03	21,829	0,778	0,953	1,834	0,920 22,90	0,091
"	"		23,8				101,5	22,32							
"	"		23,7				101,5	22,14							
06/11/2008	3	1400	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	23,6	101,5	21,95	21,950	0,756	0,959	1,783	0,920 22,90	0,091
"	"		23,4				101,5	21,58							
"	"		23,8				101,5	22,32							
06/11/2008	3	1400	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	23,5	101,5	21,76	21,825	0,749	0,953	1,767	0,920 22,90	0,091
"	"		23,5				101,5	21,76							
"	"		23,6				101,5	21,95							
06/11/2008	3	1400	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	23,4	101,5	21,58	21,640	0,729	0,945	1,720	0,920 22,90	0,091
"	"		23,5				101,5	21,76							
"	"		23,4				101,5	21,58							
06/11/2008	3	2100	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	21,8	101,5	18,73	19,210	4,093	0,839	1,621	0,920 22,90	0,091
"	"		21,7				101,4	18,58							
"	"		22,7				101,4	20,33							
12/11/2008	3	2100	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	22,7	101,5	20,33	19,674	3,890	0,859	1,541	0,920 22,90	0,091
"	"		21,6				101,5	18,39							
"	"		22,7				101,4	20,33							
12/11/2008	3	2100	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	21,6	101,5	18,39	19,727	4,083	0,862	1,617	0,920 22,90	0,091
"	"		22,7				101,5	20,33							
"	"		22,8				101,5	20,49							
12/11/2008	3	2100	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	22,8	101,4	20,51	19,379	4,157	0,846	1,647	0,920 22,90	0,091
"	"		21,8				101,5	18,73							
"	"		21,9				101,5	18,90							
12/11/2008	3	3000	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	21,0	101,5	17,38	17,379	9,165	0,759	1,141	0,920 22,90	0,091
"	"		21,5				101,7	18,18							
"	"		20,5				101,4	16,58							
12/11/2008	3	3000	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	21,0	101,5	17,38	17,386	8,914	0,759	1,110	0,920 22,90	0,091
"	"		21,5				101,5	18,22							
"	"		20,5				101,5	16,56							
12/11/2008	3	3000	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	21,0	101,5	17,38	17,385	9,112	0,759	1,134	0,920 22,90	0,091
"	"		21				101,4	17,40							
"	"		21				101,5	17,38							
12/11/2008	3	3000	T2 - 40	24,13	101,72	22,90	21,5	101,5	18,22	17,397	9,200	0,760	1,145	0,920 22,90	0,091
"	"		20,5				101,4	16,58							
"	"		21				101,4	17,40							

A-13

Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Haplustol éntico para sembradora (T3).

Fecha	Tiempo min	RPM	Tratamiento	Rugosidad Orientada inicial		Kr inic	Rugosidad Orientada		Kr final	Kr prom. final	Cantidad material (gr)	CR	Tasa relativa (T3/test, gr)	Crr y Kr	K' (Tabla)
				Altura surco (cm)	Espaciamento (cm)		Altura surco (cm)	Espaciamento (cm)							
25/08/2008	3	1400	T3	5,1	35,6	2,92	4,9	35,5	2,71	2,740	0,174	0,938	0,411	0,830	0,298
"	"		4,9				35,6	2,70							
"	"		5,0				35,5	2,82							
25/08/2008	3	1400	T3	5,1	35,6	2,92	5,0	35,7	2,80	2,774	0,137	0,949	0,322	0,830	0,298
"	"		5,0				35,5	2,82							
"	"		4,9				35,5	2,71							
25/08/2008	3	1400	T3	5,1	35,6	2,92	5,0	35,5	2,82	2,780	0,104	0,951	0,245	0,830	0,298
"	"		4,9				35,5	2,71							
"	"		5,0				35,5	2,82							
25/08/2008	3	1400	T3	5,1	35,6	2,92	5,0	35,5	2,82	2,775	0,112	0,949	0,265	0,830	0,298
"	"		4,9				35,6	2,70							
"	"		5,0				35,6	2,81							
25/08/2008	3	2100	T3	5,1	35,6	2,92	4,7	35,5	2,49	2,471	0,637	0,846	0,252	0,830	0,298
"	"		4,7				35,5	2,49							
"	"		4,65				35,5	2,44							
25/08/2008	3	2100	T3	5,1	35,6	2,92	4,7	35,5	2,49	2,474	0,662	0,846	0,262	0,830	0,298
"	"		4,65				35,4	2,44							
"	"		4,7				35,5	2,49							
26/08/2008	3	2100	T3	5,1	35,6	2,92	4,6	35,5	2,38	2,419	0,842	0,828	0,333	0,830	0,298
"	"		4,6				35,5	2,38							
"	"		4,7				35,5	2,49							
26/08/2008	3	2100	T3	5,1	35,6	2,92	4,6	35,5	2,38	2,384	0,961	0,816	0,381	0,830	0,298
"	"		4,6				35,5	2,38							
"	"		4,6				35,5	2,38							
16/09/2008	3	3000	T3	5,1	35,6	2,92	4,2	35,5	1,99	1,972	3,621	0,675	0,451	0,830	0,298
"	"		4,15				35,5	1,94							
"	"		4,2				35,5	1,99							
16/09/2008	3	3000	T3	5,1	35,6	2,92	4,2	35,5	1,99	1,941	3,478	0,664	0,433	0,830	0,298
"	"		4,1				35,5	1,89							
"	"		4,15				35,5	1,94							
16/09/2008	3	3000	T3	5,1	35,6	2,92	4,1	35,6	1,89	1,923	3,624	0,658	0,451	0,830	0,298
"	"		4,1				35,5	1,89							
"	"		4,2				35,5	1,99							
16/09/2008	3	3000	T3	5,1	35,6	2,92	4,25	35,5	2,04	1,988	3,275	0,680	0,408	0,830	0,298
"	"		4,15				35,4	1,95							
"	"		4,2				35,6	1,98							
16/09/2008	3	1400	T3-10	4,75	36,38	2,48	4,5	36,5	2,22	2,236	0,310	0,901	0,732	0,830	0,328
"	"		4,5				36,5	2,22							
"	"		4,55				36,5	2,27							
16/09/2008	3	1400	T3-10	4,75	36,38	2,48	4,55	36,0	2,30	2,246	0,264	0,905	0,623	0,830	0,328
"	"		4,5				36,5	2,22							
"	"		4,5				36,5	2,22							
16/09/2008	3	1400	T3-10	4,75	36,38	2,48	4,55	36,5	2,27	2,236	0,299	0,901	0,705	0,830	0,328
"	"		4,5				36,5	2,22							
"	"		4,5				36,5	2,22							
16/09/2008	3	1400	T3-10	4,75	36,38	2,48	4,5	36,5	2,22	2,232	0,243	0,900	0,574	0,830	0,328
"	"		4,55				36,6	2,26							
"	"		4,5				36,6	2,21							
16/09/2008	3	2100	T3-10	4,75	36,38	2,48	4,2	36,5	1,93	1,916	1,139	0,772	0,451	0,830	0,328
"	"		4,2				36,6	1,93							
"	"		4,15				36,5	1,89							
16/09/2008	3	2100	T3-10	4,75	36,38	2,48	4,1	36,6	1,84	1,871	1,146	0,754	0,454	0,830	0,328
"	"		4,15				36,5	1,89							
"	"		4,15				36,5	1,89							
24/09/2008	3	2100	T3-10	4,75	36,38	2,48	4,1	36,5	1,84	1,871	1,153	0,754	0,457	0,830	0,328
"	"		4,1				36,6	1,84							
"	"		4,2				36,5	1,93							
24/09/2008	3	2100	T3-10	4,75	36,38	2,48	4,15	36,5	1,89	1,874	1,244	0,755	0,493	0,830	0,328
"	"		4,1				36,4	1,85							
"	"		4,15				36,5	1,89							
24/09/2008	3	3000	T3-10	4,75	36,38	2,48	3,5	36,5	1,34	1,342	4,768	0,541	0,594	0,830	0,328
"	"		3,5				36,5	1,34							
"	"		3,5				36,5	1,34							
24/09/2008	3	3000	T3-10	4,75	36,38	2,48	3,35	36,5	1,23	1,282	4,707	0,517	0,586	0,830	0,328
"	"		3,45				36,4	1,31							
"	"		3,45				36,4	1,31							
24/09/2008	3	3000	T3-10	4,75	36,38	2,48	3,5	36,6	1,34	1,342	4,414	0,541	0,550	0,830	0,328
"	"		3,5				36,5	1,34							
"	"		3,5				36,4	1,35							
24/09/2008	3	3000	T3-10	4,75	36,38	2,48	3,5	36,4	1,35	1,294	4,993	0,522	0,622	0,830	0,328
"	"		3,2				36,5	1,19							
"	"		3,5				36,5	1,34							
25/09/2008	3	1400	T3-40	4,36	37,04	2,05	3,9	37,0	1,64	1,621	0,401	0,790	0,945	0,830	0,423
"	"		3,8				36,7	1,57							
"	"		3,9				37,0	1,64							
25/09/2008	3	1400	T3-40	4,36	37,04	2,05	3,9	36,8	1,65	1,682	0,398	0,819	0,938	0,830	0,423
"	"		3,9				36,8	1,65							
"	"		4,0				36,8	1,74							
25/09/2008	3	1400	T3-40	4,36	37,04	2,05	4,0	37,0	1,73	1,715	0,319	0,836	0,752	0,830	0,423
"	"		3,95				37,0	1,69							
"	"		4,0				37,0	1,73							
25/09/2008	3	1400	T3-40	4,36	37,04	2,05	4,0	36,8	1,74	1,690	0,310	0,823	0,731	0,830	0,423
"	"		3,9				37,0	1,64							
"	"		3,95				37,0	1,69							
25/09/2008	3	2100	T3-40	4,36	37,04	2,05	3,5	37,0	1,32	1,315	1,771	0,641	0,701	0,830	0,423
"	"		3,5				37,0	1,32							
"	"		3,45				36,7	1,30							
25/09/2008	3	2100	T3-40	4,36	37,04	2,05	3,6	37,0	1,40	1,352	1,573	0,659	0,623	0,830	0,423
"	"		3,5				37,0	1,32							
"	"		3,5				36,8	1,33							
25/09/2008	3	2100	T3-40	4,36	37,04	2,05	3,5	37,0	1,32	1,339	1,535	0,652	0,608	0,830	0,423
"	"		3,5				37,0	1,32							
"	"		3,55				36,8	1,37							
25/09/2008	3	2100	T3-40	4,36	37,04	2,05	3,5	36,8	1,33	1,339	1,532	0,652	0,607	0,830	0,423
"	"		3,55				37,0	1,36							
"	"		3,5				37,0	1,32							
07/10/2008	3	3000	T3-40	4,36	37,04	2,05	2,7	37,0	0,79	0,818	5,426	0,398	0,676	0,830	0,423
"	"		2,8				37,0	0,85							
"	"		2,75				37,0	0,82							
07/10/2008	3	3000	T3-40	4,36	37,04	2,05	2,75	37,0	0,82	0,798	5,500	0,389	0,685	0,830	0,423
"	"		2,7				37,0	0,79							
"	"		2,7				37,0	0,79							
07/10/2008	3	3000	T3-40	4,36	37,04	2,05	2,9	37,0	0,91	0,838	5,266	0,408	0,656	0,830	0,423
"	"		2,7				37,0	0,79							
"	"		2,75				37,0	0,82							
07/10/2008	3	3000	T3-40	4,36	37,04	2,05	2,80	37,0	0,85	0,829	5,080	0,404	0,633	0,830	0,423
"	"		2,7				37,0	0,79							
"	"		2,8				36,8	0,85							

A-14

Resultados de las simulaciones con túnel de viento en el Haplustol éntico para la parcela de referencia (testigo).

Fecha	Tiempo min	RPM	Tratamiento	Rugosidad Natural		Crr inic	Crr inic prom	Crr fin	Crr fin prom	Cantidad material	Tasa relativa
				L ₂ inic	L ₂ final						
12/11/2008	3	1400	Test	99	99,3	1,00	1,07	0,70	0,83	0,446	1,052
"	"		"	98,9	99,2	1,10		0,80			
"	"		"	"	98,9	99		1,10			
12/11/2008	3	1400	Test	99	99,2	1,00	1,13	0,80	0,87	0,497	1,172
"	"		"	98,8	99,1	1,20		0,90			
"	"		"	"	98,8	99,1		1,20			
12/11/2008	3	1400	Test	99	99,1	1,00	1,03	0,90	0,83	0,364	0,857
"	"		"	99,1	99,2	0,90		0,80			
"	"		"	"	98,8	99,2		1,20			
12/11/2008	3	1400	Test	99,1	99,2	0,90	1,03	0,80	0,77	0,390	0,918
"	"		"	99	99,3	1,00		0,70			
"	"		"	"	98,8	99,2		1,20			
13/11/2008	3	2100	Test	98,8	99,2	1,20	1,17	0,80	0,73	2,526	1,000
"	"		"	99	99,4	1,00		0,60			
"	"		"	"	98,7	99,2		1,30			
13/11/2008	3	2100	Test	98,9	99,3	1,10	1,07	0,70	0,67	2,968	1,176
"	"		"	98,9	99,3	1,10		0,70			
"	"		"	"	99	99,4		1,00			
13/11/2008	3	2100	Test	99	99,4	1,00	1,00	0,60	0,57	2,103	0,833
"	"		"	99	99,4	1,00		0,60			
"	"		"	"	99	99,5		1,00			
13/11/2008	3	2100	Test	99	99,3	1,00	1,00	0,70	0,60	2,501	0,991
"	"		"	99	99,4	1,00		0,60			
"	"		"	"	99	99,5		1,00			
13/11/2008	3	3000	Test	98,9	99,4	1,10	1,10	0,60	0,53	8,143	1,014
"	"		"	98,9	99,5	1,10		0,50			
"	"		"	"	98,9	99,5		1,10			
13/11/2008	3	3000	Test	99	99,5	1,00	1,07	0,50	0,50	7,909	0,985
"	"		"	98,9	99,5	1,10		0,50			
"	"		"	"	98,9	99,5		1,10			
13/11/2008	3	3000	Test	98,9	99,4	1,10	1,07	0,60	0,50	7,958	0,991
"	"		"	99,1	99,5	0,90		0,50			
"	"		"	"	98,8	99,6		1,20			
13/11/2008	3	3000	Test	99	99,5	1,00	1,10	0,50	0,50	8,117	1,011
"	"		"	98,9	99,5	1,10		0,50			
"	"		"	"	98,8	99,5		1,20			