



DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN AGROPECUARIA

Tesis doctoral

***Cambio de uso y degradación de los suelos en la Pampa Medanosa
Cordobesa:
Evolución, impactos y escenarios futuros***

Doctorando:

Ing. Agr. Catalina Bozzer

Director:

Ing. Agr. Dr. José Manuel Cisneros

Co-Directores:

Ing. Agr. M Sc. Oscar Giayetto

Ing. Agr. PhD. Lúcia Helena Cunha dos Anjos

Miembros de la comisión de tesis

Ing. Agr. Dr. Celio I. Chagas

Ing. Agr. Dr. Américo J. Degioanni

Ing. Agr. Dr. Hugo R. Krüger

-Abril 2021-



RESUMEN

El avance de la frontera agrícola sobre ambientes marginales de gran fragilidad ecológica en la Argentina ha ocurrido en ausencia de una planificación orientada hacia el desarrollo sustentable. En la planicie arenosa del suroeste de la provincia de Córdoba, conocida como Pampa Medanosa, la expansión de la agricultura ha ejercido una alta presión sobre el recurso suelo, habiéndose reportado en la actualidad la reactivación de procesos de degradación por erosión eólica. Hasta el presente, existe escasa información sobre el impacto del cambio de uso del suelo en la región, representado por el reemplazo de los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos por sistemas de producción puramente agrícolas que incluyen en sus rotaciones al cultivo maní (*Arachis hypogaea L.*), cuya cosecha implica operaciones de arrancado que disturbán los primeros centímetros del suelo; y no existen antecedentes del estudio del maní como integrante de rotaciones con pasturas perennes bajo sistemas mixtos agrícola-ganaderos. En la Pampa Medanosa, aún bajo siembra directa, las rotaciones predominantes muestran bajos aportes de restos vegetales y alta proporción de leguminosas anuales, cuyos rastrojos se degradan rápidamente, dejando los suelos desprovistos de cobertura y expuestos a eventos de erosión eólica.

El principal objetivo de esta tesis fue estudiar la evolución del cambio en el uso del suelo en la región de la Pampa Medanosa, representado por el reemplazo de los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos por sistemas puramente agrícolas y la introducción del cultivo del maní, e identificar sus efectos sobre indicadores de calidad y atributos del suelo relacionados con la erosión eólica, generando información de base para la identificación de macroambientes con diferente susceptibilidad a la degradación por la acción del viento con la finalidad de orientar sobre la necesidad de la implementación de alternativas de manejo sustentables para los suelos de la región.

En primer lugar, a través del análisis visual de imágenes satelitales, se confirmó la reactivación de procesos erosivos de tipo eólico en la Pampa Medanosa. Se identificaron 66.448 hectáreas de focos de erosión eólica activos, indicando que un 4,75% del total de la superficie de la región presenta reactivación de procesos erosivos señalando la necesidad de rehabilitar las tierras degradadas y evitar el avance hacia la desertificación. Por otro lado, se identificaron sectores de dunas de génesis holocena y de megadunas más antiguas, las que,

en total, suman 73.671,6 hectáreas de ambientes que requieren prácticas de protección o conservación, atendiendo su fraccionamiento por el uso agrícola.

En una segunda etapa, empleando técnicas de clasificación supervisada con imágenes satelitales, se estudió la evolución del cambio de uso del suelo en la Pampa Medanosa dado por el avance de los cultivos agrícolas anuales sobre las pasturas plurianuales, observándose que el mismo se intensificó a partir de la campaña 2006/07.

En esta investigación, a través de determinaciones analíticas, pudo observarse que reemplazo de los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos por sistemas puramente agrícolas, y la introducción del cultivo del maní en la Pampa Medanosa, afectaron negativamente a aquellos indicadores de calidad y atributos de suelo relacionados con la erosión eólica analizados. La mayoría de los indicadores evaluados reflejaron un deterioro en la calidad de los suelos bajo usos agropecuarios, tanto agrícolas como mixtos. En el estudio fueron comparados suelos bajo dos usos puramente agrícolas, uno incluyendo el cultivo de maní (A1) y otro excluyendo este cultivo (A2); y suelos bajo dos usos mixtos agrícola-ganaderos, uno con el cultivo de maní como integrante de la rotación (Mx1) y otro sin la presencia del mismo (Mx2). Los suelos bajo el uso A1 presentaron la mayor pérdida de carbono orgánico (CO), en ellos se observó que, en promedio, solo conservan un 45% del CO superficial respecto a la condición natural de referencia (N), hecho que incrementa su susceptibilidad a la erosión eólica. Los suelos bajo el uso Mx2, presentaron un mejor comportamiento de aquellos indicadores de tipo físicos -fracción erodable (FE) y estabilidad estructural en seco (EES)- que los suelos bajo uso agrícola, esto los coloca en una mejor posición frente al riesgo de erosión. En contraposición con los suelos bajo el uso A1 exhibieron valores de estos dos indicadores que evidencian su degradación y que sugieren que el grado de presión sobre el recurso suelo se halla por encima de su capacidad de uso potencial. Respecto de indicadores químicos, no se observaron efectos del uso del suelo sobre el pH, mientras que en el caso de la CIC de los sistemas agrícolas mostraron valores inferiores a los sistemas mixtos. Por otra parte, el uso del suelo explicó variaciones en las concentraciones de Ca, Mg y K, siendo los suelos bajo el uso Mx2 los que mostraron mayor disponibilidad de las tres bases. Los suelos bajo sistemas mixtos exhibieron reducciones en la concentración de fósforo extractable (P) 27-30 % relativas a N, mientras que los suelos de sistemas agrícolas sin y con maní presentaron reducciones del 50 y 60% respectivamente, en

los primeros 5 cm del perfil. La reducción de la concentración de P en los suelos bajo uso A1 se incrementó con la profundidad, mostrando una pérdida de 73 % de 5-10 cm y 77% 10-20 cm, exponiendo la importancia de realizar muestreos estratificados. De los atributos medidos, aquellos con más variabilidad explicada por el uso de del suelo en el área de estudio fueron el CO, la FE, la CIC y el K.

La variabilidad espacial de los indicadores de calidad relacionados con la erosión eólica encontrada en la Pampa Medanosa permitió su zonificación en función de la susceptibilidad a la erosión por la acción del viento. La región fue subdividida en cuatro subregiones (SRs). La primera de ellas se localiza hacia el sureste de la región, la SR-I agrupa los suelos de mejor aptitud de uso (258.700 ha), cuya tasa de erosión eólica potencial (EEP) estimada es de 21,6 t. ha⁻¹. año⁻¹. La SR de mayor extensión, abarcando el sector centro este, fue la SR-II (496.900 ha) que consta de una EEP de 41 t. ha⁻¹. año⁻¹, que duplica en potencial de erosión a la anterior. Sobre el norte y oeste se observaron dos SRs (SR-III y SR-IV), las que requieren prácticas de mitigación de la erosión y una adecuada planificación del manejo de sus suelos. Estas, en conjunto, ocupan el 47% de la planicie medanosa. La SR-III (445.000 ha) presenta una EEP de 50,9 t. ha⁻¹. año⁻¹, mientras que la SR-IV mostró el mayor riesgo de erosión (215.600 ha), con una EEP de 66,5 t. ha⁻¹. año⁻¹. Estos resultados han permitido comprender que la Pampa Medanosa es una región heterogénea en la que, para alcanzar sistemas de producción agropecuarios sustentables, es necesario implementar diferentes técnicas de mitigación de la erosión eólica y respetar el potencial de uso de los suelos de cada subregión.

El empleo de la Ecuación de la Erosión Eólica –EWEQ, por sus siglas en inglés- permitió simular los efectos de cuatro posibles escenarios de usos de suelo y rotaciones sobre el potencial de erosión eólica. Se simuló una rotación agrícola en la que predominan leguminosas, incluyendo al cultivo de maní y sin cultivos cobertura (CC) con la finalidad de predecir el potencial de erosión ante un escenario de máxima degradación. Esta situación fue la que presentó las mayores tasas de erosión, superando ampliamente el valor umbral de pérdida de suelo admisible de 8-12 t. ha⁻¹. año⁻¹. Se planteó, por otra parte, un escenario intermedio agrícola, pero excluyendo al cultivo de maní e incorporando CC luego de cada cultivo estival (soja o maíz), este escenario mostró pérdidas de suelo por erosión eólica superiores al umbral sólo en años extremadamente secos y ventosos, sugiriendo que, ante

estas condiciones adversas, la sola inclusión de la técnica de CC no sería suficiente para mitigar el proceso de degradación. Por otra parte, se simuló la modificación de las proporciones de leguminosas anuales de las rotaciones excluyendo al cultivo de maní, manteniendo los CC e implementando la realización de pasturas perennes, este escenario de conservación o mínimo deterioro mostró un impacto positivo en la reducción de las tasas anuales de pérdida de suelo en años extremos. Se propuso, además, la simulación de un escenario de conservación mixto intermedio en el que se incluyó el cultivo de maní combinado con pasturas perennes en un uso mixto agrícola-ganadero acompañado de CC, y se observó que en este escenario las pérdidas de suelo no alcanzaron el valor umbral anualmente admisible en ninguno de los años simulados. Llevar adelante la producción de maní en sistemas mixtos agrícola-ganaderos con pasturas perennes se presenta entonces como una alternativa que podría contribuir a solventar la problemática de la erosión eólica en años desfavorables en el área medanosa de la provincia de Córdoba.

ABSTRACT

In Argentina, the expansion of the agricultural frontier over marginal environments of great ecological fragility has occurred without sustainable land use policies. In the southwest of Córdoba province, in the sandy plains known as Pampa Medanososa, the agricultural expansion has exerted high pressure on the soil. This is evidenced by recent studies reporting the reactivation of wind erosion processes. However, little is known about the land use change impact on soil quality, represented mainly by the replacement of extensive livestock by purely agricultural systems and the possible effects of the introduction of peanut cultivation, crop whose harvest removes the top soil; and there are no previous studies of peanut as a component of cultivation sequences with perennial pastures under mixed agricultural-livestock systems. In the predominant agricultural systems in the Pampa Medanososa, even under direct sowing, the crop sequences show low contributions of vegetal remains and a high proportion of annual legumes, whose stubble is promptly degraded, leaving the soils devoid of cover and exposed to wind erosion events, which casts doubt on the sustainability of the current soil management practices.

The main objective of this thesis was to study the evolution of the land use change in the Pampa Medanososa region, characterized by the replacement of mixed agricultural-livestock production systems by purely agricultural systems. In particular, the introduction of peanut cultivation was analyzed to identify its effects on soil quality indicators and soil attributes related to wind erosion, generating basic information for the identification of macro environments with different susceptibility to degradation by the wind action that allow guidance on the need to implement sustainable management alternatives to the soils of the region.

In the first place, through the analysis of satellite images, the reactivation of wind erosion processes in the Pampa Medanososa was confirmed. A total of 66,448 hectares of active foci were identified. The 4.75% of the region shows erosive processes, indicating the need to rehabilitate degraded lands and to stop the desertification process. In addition, Holocene dunes and older megadunes extend to 73,671.6 hectares of environments that require protection or conservation practices, attending to their fractionation for agricultural use.

In a second stage, employing remote sensing and supervised classifications algorithms, it was observed that the change in land use in Pampa Medanos due to the advance of agriculture over mixed agricultural-livestock activities has increased since the 2006/07 season and continued up to the present. The replacement of mixed agricultural-livestock production systems by purely agricultural systems, and the introduction of peanut cultivation in the Pampa Medanos, has affected soil quality indicators and attributes related to wind erosion. The evaluated indicators reflected the degradation in soil quality under both agricultural and mixed uses, suggesting that the current uses exert an amount of pressure on the soil that is exceeding the capacities of its potential use.

Soils under two purely agricultural uses were compared, one including peanut cultivation (A1) and another excluding this crop (A2); and soils under two mixed agricultural-livestock uses, one with peanut cultivation as component of the crop sequence (Mx1) and the other without its presence (Mx2). Soils under A1 use presented the greatest loss of organic carbon (CO), 45% in the surface layer of the soil in comparison to a natural reference condition (N), increasing their susceptibility to wind erosion. The soils under Mx2 use were superior in terms of physical indicators behavior -erodible fraction (FE) and dry structural stability (DSS)- compared to agricultural ones, which places them in a better position against the risk of erosion. Regarding chemical soil quality indicators, no effects of soil use were observed on pH, whereas the mixed systems with and without peanut exceeded the agricultural ones in CEC values. The use of the soil explained variations in the concentrations of Ca, Mg and K, being the use Mx2 the one that showed the highest availability for the three bases. The soils under mixed systems exhibited reductions in the concentration of extractable phosphorus (P) of between 27 and 30% relative to N, while the soils of agricultural systems without and with peanut presented reductions of 50 and 60% respectively, in the first 5 cm of the profile. The reduction of P concentration in the soils under A1 use increased with depth, showing a loss of 73% from 5-10 cm and 77% from 10-20 cm, demonstrating the importance of using stratified sampling. The indicators with the highest sensitivity to land use in the study area were CO, FE, CIC and K.

The spatial variability of the soil quality indicators surveyed in the Pampa Medanos allowed us to observe that this is a heterogeneous environment that can be zoned according to its susceptibility to wind erosion. The region was subdivided into four sub-regions (SR).

Towards the east of the region, SR-I was identified with soils of the best aptitude (258700 ha), whose wind erosion potential rate (WEP) was $21.6 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. The largest SR was SR-II (496,900 ha), which has a WEP of $41 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. Two SRs that require erosion mitigation practices and adequate planning for the management of their soils were observed on the north and west. These two sub-regions together occupy 47% of the sandy plains. SR-III (445,000 ha) whose WEP is $50.9 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$ and SR-IV that showed the highest risk of erosion (215600 ha) with an WEP of $66.5 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$. The results have made it possible to understand that the Pampa Medanososa is a heterogeneous region in which, in order to achieve sustainable agricultural production systems, it is necessary to implement mitigation techniques for wind erosion and taking into account the potential of land use in each sub-region.

The use of the Wind Erosion Equation –EWEQ– made it possible to compare different uses and rotations to guide the selection of sustainable alternatives. An agricultural crop sequence with peanut cultivation without cover crops (CC) was simulated. This was the one that presented the highest erosion rates, widely exceeding the threshold value of 8-12 tons of allowable soil loss per hectare per year. An agricultural rotation without peanuts that included CC after each summer crop showed soil losses due to wind erosion higher than the threshold only in extremely dry and windy years, suggesting that, given these adverse conditions, the mere inclusion of this technique would not be enough to mitigate the degradation process. The modification of crop sequences and the implementation of perennial pastures is of greater importance in reducing the annual rates of soil loss in dry and windy years. Even in extreme years, the mixed use without peanut cultivation and with cover crops after the summer crops did not show soil losses due to the action of the wind. The simulations for mixed agricultural-livestock use including the cultivation of peanuts together with cover crops did not reach the threshold value of annually admissible soil loss.

Carrying out peanut production in mixed systems with perennial pastures is presented as an alternative that could contribute to solving the problem of wind erosion in unfavorable years in the Pampa Medanososa.



INDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	15
1. Introducción general.....	16
2. Marco teórico y antecedentes	19
2.1. El cambio de uso del suelo en el sur de Córdoba y el advenimiento de la problemática de la erosión eólica en la Pampa Medanosa.....	19
2.2. Los regímenes de tenencia de la tierra y su impacto en el cambio de uso del suelo	22
2.3. El cultivo de maní en el Sur Cordobés y sus riesgos.....	24
2.4. Antecedentes jurídicos sobre regulaciones para el uso del suelo en relación al cultivo del maní	26
2.5. Antecedentes en el estudio de los efectos del cambio de uso sobre el suelo en el sur de Córdoba.....	28
HIPÓTESIS	31
OBJETIVO GENERAL	32
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	32
Referencias bibliográficas	34
CAPÍTULO II. ÁREA DEL ESTUDIO: LA REGIÓN DE LA PAMPA MEDANOSA	42
1. Localización geográfica.....	43
2. Síntesis climática	44
3. Breve descripción de la vegetación original.....	48
4. Caracterización del relieve regional	48
5. Los suelos predominantes y su material de génesis	49
5.1 Descripción de los suelos predominantes de la región de la Pampa Medanosa	52
5.1.1 Haplustol éntico franco mixto término (Serie El Veintitrés, Hoja 3563-13 Huinca Renancó).....	52
5.1.2 Haplustol éntico, franca gruesa, mixta, térmica (Serie El Yarará, Hoja 3563-13 Huinca Renancó).....	54
5.1.3 Ustipsamment típico, (Serie Huinca Renancó, Hoja 3563-13 Huinca Renancó).....	57



5.1.4 Ustipsamment típico, arenoso, mixto, térmico (Serie Del Campillo, Hoja 3563-7 Del Campillo)	59
5.1.5 Ustipsamment típico, franco grueso (Serie Ea. Las Mercedes, Hoja 3563-8-3 Jovita)	61
5.1.6 Haplustol típico, franco, grueso (Serie Italó, Hoja 3563-14 Buchardo).....	63
5.1.7 Haplustol típico, franco fino, mixto, térmico (Serie Villa Huidobro Hoja 3563-13 Huinca Renancó).....	66
6. Principales procesos de degradación ambiental	68
Referencias bibliográficas	69
CAPÍTULO III DETECCIÓN DE MÉDANOS Y FOCOS DE EROSIÓN COMO INDICADORES DE AMBIENTES SUSCEPTIBLES A LA REACTIVACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN EÓLICA Y DESERTIFICACIÓN.....	
1. Introducción.....	74
2. Materiales y métodos.....	78
3. Resultados y discusión	80
3.1. Geoformas medanosas.....	80
3.2. Focos de erosión	87
4. Conclusiones.....	91
Referencias bibliográficas	92
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS MULTI-TEMPORAL DE LA DINÁMICA ESPACIAL DEL USO DE LOS SUELOS EN LA PAMPA MEDANOSA	
1. Introducción.....	96
2. Materiales y métodos.....	99
2.1. Preparación de la información espectral y topográfica	99
2.2. Coberturas y verdades de campo	100
2.3. Selección de las covariables y de los parámetros del modelo	102
2.4. Clasificación y evaluaciones de precisión	103
3. Resultados y discusión	105
3.1. Selección de las covariables	105
3.2. Determinación de los parámetros del modelo	108
3.3. Exactitud alcanzada por el modelo	109



3.4. Cambios en las coberturas y usos de la tierra: el avance de la frontera agrícola y el desplazamiento de los sistemas de producción mixtos, la relocalización del maní y el estado de las coberturas naturales.	115	
4. Conclusiones.....	126	
Referencias Bibliográficas.....	128	
CAPÍTULO V. IMPACTO DEL USO Y DEL MANEJO SOBRE INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO EN LA PAMPA MEDANOSA. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL		134
1. Introducción.....	135	
2. Materiales y métodos.....	140	
2.1. Métodos de determinación de los indicadores.....	140	
2.2. Descripción de las situaciones de uso y manejo del suelo evaluadas.....	142	
2.3. Análisis estadísticos.....	145	
3. Resultados y Discusión.....	149	
3.1. Distribución textural de los suelos estudiados en la Pampa Medanosa.....	149	
3.2. Estado actual e impactos de diferentes usos y manejos del suelo sobre el carbono orgánico del suelo en la Pampa Medanosa	149	
3.3. Estado actual e impactos de diferentes usos y manejos del suelo sobre la estabilidad estructural de los agregados superficiales en la Pampa Medanosa.....	159	
3.4. Estado actual e impactos de diferentes usos y manejos del suelo en la distribución de los agregados superficiales en la Pampa Medanosa	162	
3.5. Estado actual e impactos de diferentes usos y manejos del suelo sobre la Fracción Erodable (FE) en la Pampa Medanosa.....	167	
3.5.1. Relación entre la fracción erodable y la fracción orgánica del suelo	172	
3.5.2. Relación entre la fracción erodable y los contenidos de arena, arcilla y limo	178	
3.5.3. Comparación de la fracción erodable observada en la Pampa Medanosa con valores estimados mediante la ecuación utilizada en la versión en español de la Ecuación de la Erosión Eólica (EWEQ).....	180	
3.6. Estado actual e impactos del uso y del manejo del suelo sobre el pH en la Pampa Medanosa	182	



3.7. Estado actual e impactos del uso y del manejo del suelo sobre la capacidad de intercambio catiónico en la Pampa Medanosa.....	185
3.8. Estado actual e impacto del uso y manejo sobre los contenidos de Calcio, Magnesio y Potasio en los suelos la Pampa Medanosa	189
3.9. Estado actual e impactos del uso y manejo del suelo sobre el fósforo extractable en la Pampa Medanosa	198
4. Conclusiones.....	202
Referencias bibliográficas	205
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA SENSIBILIDAD DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO AL CAMBIO DE USO EN LA PAMPA MEDANOSA. PROPUESTA DE UN INDICE DE FÁCIL APLICABILIDAD	
1. Introducción.....	219
2. Materiales y métodos.....	221
2. Identificación de variables indicadoras sensibles al cambio uso del suelo	221
2.2. Normalización de variables indicadoras.....	222
2.3. Integración de un set mínimo de indicadores en un índice de fácil aplicabilidad.....	222
3. Resultados y discusión	224
3.1. Exploración de la sensibilidad de indicadores de calidad al cambio de uso del suelo	224
3.2. Normalización de variables indicadoras.....	228
3.3. Integración del mínimo set de indicadores en un índice de fácil aplicabilidad.....	230
3.4. Alcances y limitaciones en el uso del índice	232
4. Conclusiones.....	234
Referencias bibliográficas	235
CAPÍTULO VII. IDENTIFICACIÓN DE MACROAMBIENTES POR SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN EÓLICA EN LA PAMPA MEDANOSA	
1. Introducción.....	240
2. Materiales y métodos.....	242
Selección de indicadores para la delimitación de macroambientes.....	242
2.2 Depuración y preparación de la base de datos.....	242
2.3. Análisis de la variabilidad espacial	245
2.4. Análisis de clústeres	246



2.5. Validación de las sub regiones	247
3. Resultados y discusión	248
3.1. Preparación de la base de datos	248
3.2. Análisis espacial de componentes principales (ACP-Espacial) y análisis de clústeres	260
3.3. Caracterización de las sub regiones de la Pampa Medanosas.....	268
3.4. Validación de las sub-regiones	271
4. Conclusiones.....	273
Referencias bibliográficas	275
1. Introducción.....	280
2. Materiales y métodos.....	284
3. Resultados y discusión	287
4. Conclusiones.....	297
Referencias bibliográficas	298
CONCLUSIONES GENERALES	301
ANEXO I.....	305
CAPÍTULO VIII PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN EÓLICA EN LA PAMPA MEDANOSA	
EFFECTOS DEL USO Y MANEJO DEL SUELO	279



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1. Introducción general

El desarrollo sostenible ha sido definido como el desarrollo capaz de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras. Para alcanzarlo, es esencial armonizar tres elementos: el crecimiento económico, la inclusión social y la protección del medio ambiente. Estos elementos están interrelacionados y son fundamentales para construir un futuro inclusivo, sustentable y resiliente para las personas y para el planeta. A tal fin, debe promoverse un crecimiento económico que fomente la ordenación integrada y sostenible de los recursos naturales y de los ecosistemas (ONU, 2020).

En la actualidad, a escala mundial, la pérdida de tierras cultivables se ha estimado en 30 a 35 veces la tasa histórica. Particularmente, a causa de sequías y de la desertificación, se pierden 12 millones de hectáreas cada año (23 hectáreas por minuto) (ONU, 2019).

Esta tesis, fue pensada para la generación de nuevos conocimientos y herramientas que contribuyan al logro de la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios del sur de la provincia de Córdoba, para la que Cisneros *et al.* (2015) han estimado un incremento de un 74 % en la superficie con grado alto de afección por erosión eólica respecto a lo inferido por Marelli (1996); este grado de severidad se concentra sobre los planos arenosos del suroeste provincial y área de estudio de la presente investigación, región conocida como la “*Pampa Medanosa*” (Cabido *et al.*, 2003).

En las últimas décadas, los procesos de erosión por acción del viento en el sur de la provincia de Córdoba se han visto reactivados y, además, acelerados por las condiciones agroclimáticas predisponentes (Lorda, 2009; Genero, 2014). El Informe de Estado del Ambiente (IEA) 2017 señala que existen más de 100 millones de hectáreas del territorio argentino afectadas por algún tipo de erosión, con una tasa de pérdida de suelo de 2 millones de hectáreas por año que trae aparejado un impacto negativo sobre la productividad de los cultivos. Para el caso particular de la erosión eólica, el Informe del Estado del Ambiente (IEA) de 2018 presenta un mapa de erosión eólica potencial en el que Colazo *et al.* (2008) señalan para la región de la Pampa Medanosa una tasa de erosión eólica potencial de 100-150 t. ha⁻¹. año⁻¹. El IEA (2018) menciona que la expansión de la frontera agrícola ha

resultado en un incremento notable en la cantidad de tierras arables cultivadas y ha dado lugar a nuevas oportunidades para el sector agropecuario, pero también, ha incrementado las presiones ambientales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). En la cartografía presentada en el IEA (2012) correspondiente al Proyecto Evaluación de la Degradación de Tierras en zonas Áridas (LADA) se sitúa a la región de la Pampa Medanosa dentro de las áreas con degradación de tierras de incremento moderado, bajo agricultura de secano y sin medidas de conservación (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2012). Algunos autores mencionan como posibles causas del incremento en los registros de eventos de erosión en la región de estudio a la deforestación, el inadecuado manejo de los suelos y el avance de la frontera agrícola (Tripaldi *et al.*, 2010; Carignano *et al.*, 2014).

Un hecho que distingue y caracteriza el avance de la agricultura en el sur de la provincia de Córdoba es el incremento de la superficie destinada a la siembra del cultivo de maní (*Arachis hypogaea L.*), que, desde la campaña 2011/12, ha registrado incrementos notables en cuanto a su superficie (Genero, 2018), participando tanto en sistemas de producción puramente agrícolas como mixtos agrícola-ganaderos.

Hasta el presente, existe escasa información sobre el impacto del cambio de uso del suelo en este ambiente de transición sub-húmedo semiárido y de los posibles efectos de la introducción del cultivo de maní sobre sus suelos en producciones agrícolas. Y, particularmente, no existen a la fecha antecedentes de su estudio como integrante de rotaciones con pasturas perennes bajo sistemas mixtos agrícola-ganaderos. Por consiguiente, el objetivo general de esta tesis fue estudiar la evolución del cambio en el uso del suelo en la región de la Pampa Medanosa, representado por el reemplazo de los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos por sistemas puramente agrícolas y la introducción del cultivo del maní, e identificar sus efectos sobre indicadores de calidad y atributos del suelo relacionados con la erosión eólica, generando información de base para la identificación de macroambientes con diferente susceptibilidad a la degradación por la acción del viento que permitan orientar sobre la necesidad de implementar alternativas de manejo sustentables para los suelos de la región.

Esta investigación fue subdividida en seis partes. En primer lugar, se procedió a la identificación de focos de erosión eólica activos y de médanos como indicadores de ambientes susceptibles a la reactivación de procesos de erosión eólica y a procesos de desertificación en la región. Una vez evidenciada la reactivación de los procesos de erosión y la susceptibilidad a la erosión eólica en la región, se llevó adelante un análisis multi-temporal de la dinámica espacial del cambio de uso de los suelos desde 2006/07 hasta el presente mediante herramientas de teledetección con la finalidad de observar el avance de la frontera agrícola, el reemplazo de los sistemas mixtos agrícola-ganaderos por la agricultura y la migración del cultivo de maní. Luego de comprender y caracterizar el cambio de uso del suelo acaecido en la región, se estudió su impacto sobre indicadores de calidad relacionados con el principal proceso de degradación de la región: la erosión eólica. Con ello se pretendió brindar un diagnóstico del estado actual de los suelos regionales que fue complementado con un análisis exploratorio de la sensibilidad de los indicadores de calidad de suelo estudiados al cambio de uso local. La variabilidad intrarregional hallada posibilitó la determinación de macro ambientes con diferentes niveles de susceptibilidad a la erosión eólica. En una última instancia, se simuló la variación de las tasas de erosión eólica potencial en función de diferentes escenarios de uso y manejo del suelo, con la finalidad de contribuir a la identificación alternativas sustentables.

2. Marco teórico y antecedentes

2.1. El cambio de uso del suelo en el sur de Córdoba y el advenimiento de la problemática de la erosión eólica en la Pampa Medanosa

La degradación del suelo es la pérdida o disminución de una, alguna, o todas las características que hacen que el mismo sea adecuado para producción de alimentos. Los procesos de degradación devienen, entonces, del deterioro de sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Young *et al.*, 2015). En la actualidad el 52% de la tierra utilizada para la agricultura en el mundo se ve moderada o severamente afectada por procesos de degradación (ONU, 2019).

La erosión eólica es uno de los procesos de degradación de los suelos más importante de los ecosistemas áridos y semiáridos; se define como aquel proceso mediante el cual se produce la remoción, selección y transporte del material superficial del suelo por acción del viento (Chepil, 1945). Es un proceso morfogenético, que en los últimos tiempos se ha visto acelerado por la acción del hombre (Buschiazzo y Aimar, 2003). Es decir, que si bien la erosión eólica es un proceso exógeno que ocurre naturalmente durante los ciclos geológicos, las alteraciones antrópicas de los ecosistemas que no consideran su dinámica ni evolución geomorfológica causan profundas transformaciones en su equilibrio; desencadenando o acelerando la rápida degradación del ambiente (Rice, 1983).

Los daños que los procesos de erosión eólica ocasionan impactan directamente en la provisión de servicios ecosistémicos que el suelo brinda (MEA [Millennium Ecosystem Assessment], 2005). El valor económico de esta pérdida no es un costo que se incluya en los balances económicos, según Buschiazzo *et al.* (2000) pérdidas sucesivas de suelo podrían disminuir hasta en un 20 % el valor comercial de la tierra y hasta en un 25 % su productividad en tan sólo 10 años. Situación que obligaría, en el largo plazo, al productor agropecuario a incluir más insumos en sus agrosistemas, derivando en un incremento de los costos de producción y en la inviabilidad, tanto económica como ambiental, de sus actividades como resultado de un uso y manejo no sustentables (Lorda y Caviglia, 2012).

En las últimas décadas, algunos autores mencionaron la reactivación de procesos de deflación sobre el sur de la provincia de Córdoba; vinculando estos acontecimientos a la deforestación, al inadecuado manejo de los suelos y al avance de la frontera agrícola (Tripaldi *et al.*, 2010; Carignano *et al.*, 2014); y acelerándose por condiciones agroclimáticas predisponentes como vientos de velocidades erosivas y ciclos de escasez de precipitaciones (Lorda, 2009; Genero, 2015).

Particularmente, los procesos de erosión eólica han cobrado mayor importancia y dimensión hacia el suroeste de la provincia de Córdoba, donde se localiza la planicie arenosa conocida como Pampa Medanosa, región de estudio del presente trabajo. Sobre este sector, durante las últimas dos décadas se presentaron varios años secos consecutivos que, conjuntamente con el uso y el manejo inadecuados de los suelos, agravaron la problemática de la erosión induciendo la aceleración de este fenómeno que naturalmente ocurre en la región como consecuencia de la fragilidad de sus suelos explicada por su escasa evolución (Jarsún *et al.*, 2006).

La Pampa Medanosa comprende más de 1.400.000 hectáreas, ocupando casi por completo el departamento General Roca y el sector sur del departamento Río Cuarto. La génesis de sus suelos se desarrolló sobre depósitos eólicos pleistocenos y holocenos, agrupados por Iriondo y Kröhling (1995) en una gran unidad geomorfológica denominada Sistema Eólico Pampeano [SEP]. Estos sedimentos presentan dos orígenes: por un lado, la intensa actividad volcánica de fines del Terciario y del Cuaternario en la zona cordillerana andina y en la provincia de Córdoba, y por otro, la acción eólica sobre las Sierras Pampeanas.

Dada la fragilidad intrínseca de los suelos de la región coherente con su génesis y grado de evolución, la conjunción de las condiciones climáticas predisponentes y la falta de planificación en el uso y el manejo de los suelos, podrían haber ocasionado la reactivación de los procesos de erosión eólica en la Pampa Medanosa Cordobesa. La Agencia de Extensión Rural AER INTA Huinca Renancó ha presentado trabajos y realizado actividades de extensión en la zona para atenuar la problemática con anterioridad al año 2015 (Genero, 2015). Martellotto (2014) remarcó que la demanda de atención sobre este proceso de degradación surgió por iniciativa de las asociaciones de productores de la región, quienes se enfocaron en la búsqueda e implementación de alternativas de mitigación de corto plazo.

Mencionó, además, que es requerida la generación o modificación del marco legal para encontrar soluciones viables en el largo plazo, visto que, en el sur de la provincia de Córdoba, el desarrollo y la expansión de la agricultura han ejercido una gran presión sobre el recurso suelo reportándose voladuras de grandes dimensiones. Por otra parte, resaltó que uno de los ejes principales a atender es la falta de mapas en los cuales se indique la localización de aquellos suelos con mayor probabilidad de sufrir erosión. Genero (2015) refirió a la posibilidad de llevar adelante sistemas integrados, la inclusión de cultivos cobertura y de barreras forestales, evitar el pastoreo de rastrojos – actividad frecuente en la región-, y destacó la necesidad de la inclusión y del aumento del porcentaje de gramíneas en las secuencias de cultivos.

Existen antecedentes previos de la ocurrencia de incrementos marcados en la superficie agrícola sobre la denominada “zona de erosión” de Córdoba (Dptos. Gral. Roca, Río Cuarto y Juárez Celman) por el Instituto de Suelos y Agrotecnia (1948) ocurridos entre 1925/26 y 1937/38; en los que la superficie destinada a la agricultura se triplicó en poco más de diez años como consecuencia de la expansión del cultivo de trigo en tiempos de posguerra. Esto coincidió con épocas de grandes sequías y con los mayores registros de eventos de erosión eólica y desertificación. Sin embargo, el sector Cordobés de la “zona de erosión” fue aquel que menos stock de ganado vacuno perdió en aquel momento en comparación con los sectores pertenecientes a las provincias de La Pampa y Buenos Aires, lo que da cuenta del predominio de los sistemas mixtos en aquel entonces y de su inadecuado manejo, caracterizado por el sobrepastoreo, la elevada carga animal y los laboreos inoportunos, que facilitaron la acción devastadora de los vientos y favorecieron la erosión transformando campos en extensas playas voladas (Instituto de Suelos y Agrotecnia, 1948).

A diferencia de la situación descrita anteriormente, la situación actual está caracterizada por la simplificación de los planteos productivos en base a cultivos estivales, del mismo modo que ocurre a nivel nacional, contribuyendo al incremento del riesgo climático, económico y biológico, a la pérdida de materia orgánica y a la sobre extracción de micro y macronutrientes (Casas, 2006). La superficie total nacional destinada al cultivo de soja se incrementó un 233 % desde 1990/91 hasta 2014/15 (SIS-RIAN, 2018) situación que revela una tendencia hacia la homogeneización del paisaje agrícola (Aizen *et al.*, 2009). Desde los años 90’ la agricultura ha avanzado en Argentina sobre ambientes naturales y se

ha desplazado a la actividad ganadera. Las actividades agropecuarias que se articulaban en sistemas extensivos mixtos funcionan hoy en día como sistemas independientes en los que la producción ganadera comenzó a realizarse mayormente en confinamiento y la agricultura se expandió sobre la superficie que ocupaban antaño estos sistemas extensivos (Viglizzo *et al.*, 2010). Algunos autores, mencionan la expansión de la frontera agrícola y la intensificación de la agricultura en relación al advenimiento de un ciclo húmedo (Cisneros *et al.*, 2006; Sierra y Pérez, 2006; Cisneros, 2010). Mientras que otros autores vinculan estos sucesos a la incorporación de nuevas tecnologías e insumos (Pengue, 2001; Viglizzo *et al.*, 2001; Viglizzo *et al.*, 2003). Sin embargo, la gran mayoría de los autores concuerdan en que el cambio de uso y las modalidades de producción han prevalecido sobre las prácticas de manejo y conservación de los suelos (Cisneros *et al.*, 2004; Altieri y Pengue, 2006; Duval *et al.*, 2015).

Particularmente, la expansión de la agricultura en el sur de la provincia de Córdoba se distinguió de la expansión agrícola a nivel nacional por el aumento de la superficie destinada a la siembra del cultivo de maní. A mediados de la década de los 90', el cultivo de maní emprendió su migración desde el centro hacia el sur provincial como consecuencia del deterioro físico y biológico de los suelos del histórico núcleo manisero (Cisneros *et al.*, 1997). En el ciclo 2001/02 comenzó a instaurarse en el Dpto. Gral. Roca y desde la campaña 2011/12 registró notables incrementos en su superficie (Genero, 2018).

2.2. Los regímenes de tenencia de la tierra y su impacto en el cambio de uso del suelo

Martelloto (2014), menciona que, en parte, las voladuras de los suelos en el suroeste provincial podrían ser explicadas por los regímenes de arrendamiento anuales de la tierra y los precios internacionales de los granos. Según Canale (2018) más del 60% de los campos del sur provincial son alquilados. Degioanni *et al.* (2013) han indicado que estos sistemas de arrendamientos de corto plazo propician la simplificación de los sistemas productivos, lo que incrementa la dependencia del comportamiento climático y conlleva a la ausencia de tiempos y procesos de recupero de la capacidad productiva de los suelos.

Existen precedentes de la instauración de este tipo de arrendamientos de corto plazo traccionados por contextos económicos que causaron fenómenos erosivos y generaron grandes perjuicios en el partido de Villarino (provincia de Bs. As.) y en el deslinde de la provincia de La Pampa con San Luis y Córdoba; los registros datan de la década del 30'. En esta zona, netamente ganadera antes de 1914-1915, en tiempos de posguerra inició el auge de la agricultura conjuntamente con la subdivisión de las tierras a través del acceso a préstamos en subastas públicas del Banco Hipotecario Nacional. Al mismo tiempo, comenzaron a perderse las cosechas por la falta de lluvias oportunas, continuándose luego con años de sequías prolongadas y vientos intensos. Ante estas eventualidades devino la descapitalización de los propietarios de las explotaciones y nació un sistema de arrendamientos “en especie” (porcentaje de la producción) como consecuencia del fracaso de las explotaciones agrícolas de aquella época ante la variabilidad climática. Del análisis de los registros de los arrendamientos del CNA (1937) surgió la evidencia de que las áreas donde esta tipología de arrendamientos acusó un alto índice coincidieron con aquellas con mayores registros de erosión eólica durante la gran sequía de 1937 y años posteriores. A raíz de ello, en 1940, el Banco Hipotecario Nacional suprimió los arrendamientos en especie (Instituto de Suelos y Agrotecnia, 1948). Según Tripaldi *et al.* (2013), la gran sequía de 1937 fue la peor sequía de los últimos 100 años.

Una de las causas de la difusión de esta modalidad de arrendamientos en las últimas décadas, fue la aparición de nuevos actores en el sector agropecuario como los grandes pools de siembra. Especialmente, en el sur de Córdoba, se le suma a ello el alto valor de alquiler pagado a los propietarios a precio dólar en un contexto económico en el que la moneda nacional se halla fuertemente devaluada, por las empresas productoras de maní del centro de la provincia en busca de suelos con menor historia agrícola. En la actualidad, Argentina se ha posicionado como uno de los principales exportadores de maní a nivel mundial y su producción es reconocida internacionalmente por la calidad de su producción. Alrededor del 95% del cultivo se realiza en Córdoba y el 100% de la producción se industrializa en la misma provincia, agregando valor al producto y generando empleo (Fiant *et al.*, 2015). Esto demarca la importancia del cultivo dentro de la economía regional. Durante la campaña 2014/15 se alcanzó la máxima superficie cultivada con maní a escala nacional. En esta campaña, del

total provincial, un 29% fue sembrado en el departamento Gral. Roca (SIS-RIAN, 2018); donde se localiza la región de estudio. En 2015, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentos de la provincia de Córdoba, a través de la resolución 43/15, creó el Registro Provincial de Lotes Cultivados con Maní (Portal de noticias del Gobierno de la provincia de Córdoba, 2014), hecho concreto que evidenció la relevancia del acrecentamiento espacio-temporal de la superficie dedicada al cultivo de maní.

2.3. El cultivo de maní en el Sur Cordobés y sus riesgos

La migración del cultivo de maní hacia el sur de Córdoba, este de San Luis y norte de la Pampa ha sido explicada como consecuencia de las decisiones de los productores del cultivo de arrendar campos cuyos suelos presentaran una menor historia de uso agrícola o con pasturas como antecesores, con texturas más gruesas que propiciaran el clavado y el arrancado, con una mejor aptitud físico-biológica, en los que se consigue una mejor calidad del producto (Cisneros *et al.*, 2006).

Las características de la realización del cultivo de maní, su bajo aporte orgánico y las operaciones de arrancado traen consigo riesgos de degradación para los suelos (Cisneros *et al.*, 2006) y, por consiguiente, podría verse afectada su calidad. La calidad de un suelo, agrónomicamente, es definida como la capacidad que tiene el mismo para funcionar, tanto en presente como en el futuro (Doran y Parkin, 1994), y puede ser evaluada a través de indicadores y de su comparación con situaciones de referencia (Shukla *et al.*, 2006). Uno de los indicadores más empleados ha sido el carbono orgánico, por ser un indicador temprano de los cambios en la calidad de un suelo; los índices basados en el estudio este indicador son útiles para evaluar cambios de calidad bajo diferentes prácticas de manejo (Blair *et al.*, 2006). Alteraciones de este indicador impactan directamente en la estabilidad estructural de un suelo, variable determinante de su fertilidad física (Cosentino y Kraemer Bherens, 2017). La estabilidad estructural y la fracción erodable (agregados menores a 0,84 mm) son atributos relacionados con la erosión por acción del viento (Skidmore y Layton, 1992); ampliamente empleados para estudiar la susceptibilidad a la erosión eólica en la Región Pampeana

Argentina (Colazo y Buschiazzo, 2010; Druille *et al.*, 2013; Zilio *et al.*, 2016; de Dios Herrero *et al.*, 2017).

Algunos estudios previos, han concluido que suelos bajo agricultura en los que se ha cultivado maní han presentado transformaciones que necesariamente deben ser tenidas en cuenta a los fines de asegurar una economía regional manisera sustentable; destacándose entre ellas la pérdida de la materia orgánica (Uberto *et al.*, 2002; Tittone, 2004), el aumento de la fracción erodable y la disminución de la estabilidad estructural, principalmente en suelos arenosos (Allochis y Quintana, 2017). Sin embargo, el cultivo de maní como parte de rotaciones mixtas agrícola- ganaderas no ha sido previamente estudiado.

La evolución del cambio de uso del suelo en la región de la Pampa Medanosa, el reemplazo de los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos por sistemas puramente agrícolas, y la introducción del cultivo del maní, podría estar induciendo efectos negativos sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos de la región e incrementando el riesgo de desencadenar procesos de erosión eólica.

La erosión eólica es la principal causa física de la desertificación en ambientes áridos y semiáridos en la Argentina (Buschiazzo, 2012), por ello, el análisis de los cambios de uso del suelo y la evaluación diagnóstica del estado actual de los suelos en la Pampa Medanosa -inserta en la Región Pampeana Semiárida Argentina (RPSA)- es fundamental a los fines de generar información para promover la prevención de la erosión. Cantú *et al.* (2007) señalan que si se puede evaluar la presión de uso a la que está sometido un recurso natural y los cambios de calidad de ese recurso, se puede entonces evaluar el efecto de esa presión y establecer la necesidad de regulaciones o su modificación si las mismas ya existieran. La realización de un diagnóstico del estado actual de indicadores de calidad de suelo bajo diferentes usos y manejos del suelo en la región permite orientar sobre el estado de degradación de sus suelos y obtener información para conocer cuáles son las alternativas de uso y manejo más sustentables. La información debe llegar a los actores sociales involucrados en la toma de decisiones, contribuyendo de este modo al ordenamiento territorial en el medio rural, a incorporar la dimensión ambiental a la toma de decisiones y a la formación de sistemas de producción agropecuarios ambientalmente sustentables, económicamente viables y temporalmente sostenibles.

El uso de prácticas de conservación, que aumenten la cobertura superficial del suelo –como siembra directa y cultivos cobertura– y un adecuado manejo de los cultivos anteriores y posteriores al maní, podrían contribuir a subsanar la problemática de la erosión eólica los suelos y conducir a la realización del cultivo en la región en un modo sustentable manteniendo las pérdidas de suelo por erosión eólica por debajo del valor umbral tolerable, siendo este aquel en el que la erosión geológica se aproxima a la tasa de formación de suelo (Woodruff y Siddoway, 1965).

2.4. Antecedentes jurídicos sobre regulaciones para el uso del suelo en relación al cultivo del maní

Para disminuir la degradación de los suelos por erosión eólica ante la realización del cultivo de maní, en provincias como La Pampa y San Luis, los gobiernos establecieron la obligatoriedad en la implementación de ciertas prácticas de manejo con carácter de ley, mientras que, en la provincia de Córdoba, se incentivó a la adopción voluntaria de prácticas de manejo capaces de contribuir a la mitigación de la problemática a través de reducciones de las tasas impositivas.

La provincia de San Luis cuenta con la Ley N° IX-0315-2004 (5461“R”) de Protección y Conservación de Suelos, reglamentada en el año 2007. Esta ley surge para dar respuesta a la pérdida de estabilidad de los suelos debida al incremento de la agricultura en la provincia de San Luis, en la que existen distintos tipos de suelos con diferente susceptibilidad a procesos erosivos y de degradación. Mediante ella, el gobierno creó comisiones de estudio encargadas de la zonificación de la provincia y, conforme a la magnitud de la ocurrencia de los procesos erosivos, les otorgó la facultad de definir, por un lado, Distritos de Conservación y Manejo Obligatorio de Suelos y, por otro lado, Distritos de Conservación y Manejo Voluntario de Suelos. A través de esta ley, la provincia, exige la presentación de planes de manejo y conservación avalados por ingenieros agrónomos con un mínimo de tres años de planificación. Además, establece que, en zonas con problemáticas de erosión eólica, sólo podrán realizarse labores que dejen al menos un 40% de cobertura de suelo, y sólo podrán realizarse cultivos anuales en años consecutivos bajo siembra directa.

Para las áreas de médanos, restringe su uso a la actividad forestal (Ley N° IX-0315-2004 (5461), 2004).

La provincia de La Pampa es la que más ha avanzado en cuanto a los marcos legales para la protección de sus suelos hasta la actualidad. Cuenta con la Ley 2.139 del año 2005, en la que la autoridad de aplicación queda facultada para definir áreas de manejo y conservación en el ámbito provincial de tres tipos: áreas con prácticas de manejo, conservación y/o recuperación obligatoria; áreas con prácticas de manejo, conservación y/o recuperación voluntaria; y áreas con prácticas de manejo, conservación y/o recuperación experimental.

Reglamentada por el decreto N° 3162/07; la Ley 2.139 fue creada como consecuencia de la notable expansión del cultivo de maní sobre zonas de alta susceptibilidad a la erosión eólica que, dadas las características de su cosecha, en el período de postcosecha donde se presentan los mayores riesgos de degradación del suelo, deja los suelos desprovistos de cobertura y con alto grado de susceptibilidad a la erosión eólica. En vista de ello, la Ley 2.139 establece la obligatoriedad de la inscripción en el registro de planes de manejo de cultivos de productores agrícolas de la provincia de La Pampa para aquellos productores que realicen el cultivo. Además, cuenta con el Anexo III Resolución 561/10 que enumera las buenas prácticas para la realización del cultivo de maní. Algunas de ellas son: el cultivo de maní debe realizarse en franjas alternadas con maíz o sorgo como cultivos protectores; el ancho de las franjas protegidas no debe exceder los 40 m, dejando a criterio del profesional su reducción en función de los riesgos de erosión; la faja protectora no podrá ser menor a 10 m; posteriormente a la cosecha del maní se debe establecer un cultivo de cobertura; el cultivo de maní no puede volver a realizarse sino hasta después de tres años y solo en siembra directa. Además, sugiere la reposición de los nutrientes extraídos mediante fertilizantes, particularmente de fósforo. La ley también establece que no son recomendables las siembras de maní en ambientes muy frágiles y susceptibles a la erosión tales como suelos de textura arenosa-franca con tenores de un 80% de arena y suelos poco profundos (Ley 2139, 2005).

En la provincia de Córdoba, pionera en la realización del cultivo, se presenta con carácter de ley el Programa de Buenas Prácticas Agropecuarias (BPA) de Córdoba (Ley 10.633, 2019), sin embargo, no existe una reglamentación puntual para la protección de los



suelos en relación a la erosión eólica que pudiera generar la cosecha del cultivo de maní; aunque ya posee un registro provincial para lotes en los que se realizara el cultivo.

A nivel de actores políticos y sociales, existe conciencia de la problemática, ya que, en el año 2010, fue creado el Distrito Córdoba Eólica en el marco de la Ley de Protección y Conservación de Suelos de la provincia (Ley provincial N° 8936, 2001). Que en su Artículo 1° declara de orden público la conservación de suelos, la prevención de los procesos de degradación, la recuperación de suelos degradados y la promoción de la educación conservacionista del suelo y, en su Artículo 2°, establece que quedan sometidos a las disposiciones de la misma los suelos rurales del territorio provincial de propiedad pública o privada. El Distrito de Recuperación de Suelos “Córdoba Eólica”, ocupa 3.100.000 has, comprende gran parte de los Departamentos Río Cuarto, General Roca y Juárez Celman, pequeñas superficies del Departamento Presidente Roque Sáenz Peña y sur de los Departamentos Unión y Marcos Juárez. La provincia establece que todos los productores tenedores de cualquier título de campo en el área del Distrito de Recuperación de Suelos “Córdoba Eólica” deben tomar conocimiento de la normativa establecida en el Artículo 8° de la Ley Provincial N° 8.936, que determina, entre otros aspectos, la obligatoriedad de la presentación de planes prediales de recuperación de suelos en forma individual o colectiva” (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentos de la Prov. de Cba., 2010).

Luego, en el año 2014, el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentos de la provincia de Córdoba en el marco de la Ley 8.936 creó el Consejo Regional de Conservación de Suelos del departamento General Roca, con el objetivo de sumar una herramienta más a la protección del recurso suelo en el territorio provincial (Portal de noticias del Gobierno de la Prov. de Cba., 2014). Sin embargo, aún no se cuenta actualmente con una legislación vigente específica para la realización del cultivo de maní.

2.5. Antecedentes en el estudio de los efectos del cambio de uso sobre el suelo en el sur de Córdoba

La introducción del cultivo de maní podría no estar siendo la única responsable de los eventos de degradación de suelos del sur de Córdoba. La misma es parte de un conjunto de prácticas de manejo asociadas a un cambio en el uso del suelo que podrían estar induciendo la pérdida de calidad e incrementando la susceptibilidad a la degradación física. En los sistemas de producción agrícolas predominantes en la Pampa Medanosas, aún bajo siembra directa, las secuencias de cultivos presentan bajos aportes de restos vegetales y gran proporción de leguminosas anuales, cuyos rastrojos se degradan rápidamente dejando los suelos desprovistos de cobertura, poniendo en duda la sustentabilidad del manejo actual en este ambiente, tanto en los sistemas mixtos como en los agrícolas.

Casas (2015) ha mencionado que el avance de la frontera agrícola en Argentina ocurrió sin una adecuada planificación regional sobre áreas de baja resiliencia y zonas marginales de gran fragilidad ecológica, esta situación, conjuntamente con períodos de sequía, podría ser capaz de desencadenar procesos de desertificación difícilmente reversibles. Schneider (2005) señaló la pérdida de servicios ecosistémicos y el advenimiento de procesos de degradación dentro la región como consecuencia de la deforestación y de la pérdida de biodiversidad, en un estudio realizado sobre el Corredor Biogeográfico del Caldenal, localizado dentro de la Pampa Medanosas. Este corredor, está constituido por relictos de montes nativos y es el hábitat de la especie endémica *Prosopis caldenia* Burkart. El corrimiento de la frontera agrícola no solo representó un cambio de uso del suelo por sobre la ganadería adoptando prácticas de manejo desde la Pampa Húmeda, sino que, además, ha inducido el reemplazo pastizales y ha fraccionando la vegetación nativa como ha sido señalado por Tittonel (2004).

Dentro de la región de estudio, López Fourcade *et al.* (2008) estudiaron la susceptibilidad de los suelos a la erosión eólica producto de diversos usos en cercanías de las localidades de Washington y Del Campillo. Estos autores, encontraron que el escaso porcentaje de coloide inorgánico del suelo hace a la estabilidad de la estructura dependiente de los componentes orgánicos y de su condición biológica. Las situaciones de uso puramente agrícolas y la ganadería sobre forrajeras anuales de su estudio mostraron entre 30 y 32% más de fracción erodable, y un 38 a un 40% menos de estabilidad de agregados que una situación de referencia de mínimo deterioro. En el estudio, los autores, concluyeron que una situación

ganadera sobre pastizales fue capaz de lograr, aproximadamente, la misma estabilidad de agregados que una situación de mínimo deterioro y de superarla en su contenido de carbono orgánico. Esto resalta la importancia de la planificación de las rotaciones y del uso con la finalidad de solventar la problemática de la susceptibilidad natural de los suelos de la región a la erosión eólica. Los resultados mostrados por los autores denotaron la importancia de la incorporación de pasturas perenes para la recuperación de los suelos de este ambiente. Los autores explican también que los niveles de degradación alcanzados por estos suelos cuando su aptitud de uso potencial no coincide con el uso actual y son sometidos a una gran presión de uso, tanto en un uso agrícola continuo como en un uso ganadero con manejos inapropiados, exponen a estos ambientes a un alto riesgo de sufrir erosión eólica, pudiendo llegar a circunstancias irreversibles como la formación de médanos.

De Prada *et al.* (2004), señalan la necesidad de estudiar los efectos de las rotaciones sobre la pérdida de suelo y rendimiento del cultivo de maní para años con condiciones climáticas predisponentes a erosión eólica en los sistemas maniseros del sur-oeste de Córdoba. Estos autores, muestran que una estrategia efectiva para mejorar los niveles de rendimientos del maní, en el centro-sur de la provincia, sería la rotación del cultivo con una proporción del 10 % dentro de una rotación de largo plazo con pasturas perennes. Según estos autores, esta alternativa, podría incrementar los rendimientos promedios del maní entre 4 y 10 qq. ha. ⁻¹año⁻¹ y al mismo tiempo reducir los niveles de erosión hídrica entre 1 y 6 t. ha⁻¹. año⁻¹. A tales fines, el cultivo requeriría de ciclos de rotación de entre 9 y 14 años.

Hasta el presente, se cuenta con numerosos ensayos sobre la implantación de cultivos cobertura en el sur de Córdoba para subsanar la problemática de la degradación de los suelos por erosión eólica luego de la cosecha del cultivo de maní (Vicondo *et al.*, 2016; Colazo *et al.*, 2017; Genero y Colazo, 2019), sin embargo, no se cuenta a la actualidad con estudios comparativos respecto del impacto del cambio de uso del suelo y la introducción del cultivo de maní sobre indicadores de calidad de suelo en sistemas de producción agrícola y mixtos agrícola- ganaderos en la Pampa Medanosa y su relación con la erosión eólica.

HIPÓTESIS

Hipótesis 1: Los procesos de erosión eólica y de desertificación se han reactivado en la Pampa Medanosa.

Hipótesis 2: La superficie dedicada a la agricultura ha continuado incrementándose en la Pampa Medanosa desplazando a las actividades mixtas agrícola-ganaderas en el período 2006/07 – 2018/19.

Hipótesis 3: El reemplazo de los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos por sistemas puramente agrícolas, y la introducción del cultivo del maní en la Pampa Medanosa, afecta negativamente a los indicadores de calidad de sus suelos y atributos relacionados con la erosión eólica.

Hipótesis 4: La Pampa Medanosa es un ambiente heterogéneo que puede ser subdividido en ambientes con diferente susceptibilidad a la erosión eólica.

Hipótesis 5: El uso mixto agrícola-ganadero y la planificación de rotaciones con inclusión de cultivos cobertura contribuyen a la gestión sustentable de los suelos en la Pampa Medanosa reduciendo la pérdida de suelo por erosión eólica.

OBJETIVO GENERAL

Analizar el cambio de uso del suelo en la región de la Pampa Medanosa, representado por el reemplazo de los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos por sistemas puramente agrícolas, y la introducción del cultivo del maní en la Pampa Medanosa. Evaluar sus efectos sobre indicadores de calidad del suelo y atributos relacionados con la erosión eólica. Generar información de base para la identificación de macro ambientes con diferente susceptibilidad a la degradación por erosión eólica y alternativas de manejo sustentable.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Objetivo I: Detectar focos actuales de erosión/ desertificación y ambientes susceptibles a la erosión eólica.

Objetivo II: Reconstruir la evolución temporal y espacial de los cambios del uso del suelo en la Pampa Medanosa Cordobesa, desde 2006/07 hasta la actualidad.

Objetivo III: Analizar el impacto de la adopción de diferentes usos y manejos del suelo sobre un set de indicadores representativos de la calidad de los suelos en la Pampa Medanosa, incluyéndose indicadores relacionados con la erosión eólica.

Objetivo IV: Identificar un set mínimo de indicadores de calidad de suelo sensibles al cambio de uso del suelo en la Pampa Medanosa para la construcción de un índice capaz de reflejar el principal proceso de degradación el deterioro ambiental; estableciendo valores de referencia de máximo y mínimo deterioro ambiental.

Objetivo V: Obtener subregiones por susceptibilidad a la erosión eólica en la Pampa Medanosa.



Objetivo VI: Simular la pérdida potencial de suelo por erosión eólica en la Pampa Medanosa y su variabilidad intrarregional.

Objetivo VII: Comparar la variación de la tasa anual de erosión eólica ante el cambio en el uso y manejo de suelos en la Pampa Medanosa, considerando escenarios futuros: de máxima degradación, intermedios y de mínima degradación.

Referencias bibliográficas

- Aizen, M. A., L. A. Garibaldi, y M. Dondo. (2009). Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina.
- Allochis, H., y V. Quintana. (2017). *Efecto del maní sobre las propiedades físicas y la erosión eólica en suelos de texturas contrastantes de la Región Semiárida Pampeana*. Universidad Nacional de La Pampa, La Pampa, Argentina.
- Altieri, M. A., y W. A. Pengue. (2006). GM Soybean: Latin America's new colonizer. *Seedling*, 13-17.
- Blair, N., R. D. Faulkner, A. R. Till, y P. R. Poulton. (2006). Long-term management impactions on soil C, N and physical fertility. Part I: broadbalk experiment. *Soil Till Res* 91: 30–38.
- Blarasin, M., A. Cabrera, y E. Matteoda. (2014). *Agua subterráneas de la provincia de Córdoba*.
- Buschiazzo, D. E. (2012). Resumen Ejecutivo. Red de monitoreo y control de la erosión eólica en Argentina. Proyecto específico de INTA Cód. AERN-29557., 40.
- Buschiazzo, D. E., y S. B. Aimar. (2003). Erosión eólica: procesos y predicción. . En A. D. Golber y A. G. Kin (Eds.), *Viento, Suelo y Plantas*. Buenos Aires, Argentina: INTA.
- Buschiazzo, D. E., N. Zanotti, H. Mirassón, M. Zappa, y S. Abascal. (2000). Incidencia económica de la erosión eólica en sistemas de labranza en la región semiárida. *Siembra Directa*, 2, 319-325.
- Cabido, D., M. R. Cabido, S. M. Garré, J. A. Gorgas, R. A. Miatello, A. C. Ravelo, . . . H. Acuña (Mapa). (2003). Regiones naturales de la provincia de Córdoba. BID-PID 013/2009-2015. Bases ambientales para el ordenamiento territorial del espacio rural de la provincia de Córdoba. En <http://www.ordenamientoterritorialcba.com/web3/>
- Canale, A. (2018). Entrevista a los Ing. Alejandra Canale, Eugenio Fernandez y Cecilia Marquez. Por la erosión eólica, se pierden cuatro toneladas por hectárea en el sur provincial. *Portal de Noticias de LV 16*. En Portal de Noticias de LV 16 website: <https://www.lv16.com.ar/sg/nota/109145/por-la-erosion-eolica-se-pierden-cuatro-toneladas-por-hectarea-en-el-sur-provincial>
- Cantú, M. P., A. Becker, J. C. Bedano, y H. F. Schiavo. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2), 173-178.

- Carignano, C., D. Kröhling, S. Degioanni, y M. Cioccale. (2014). *Geomorfología*. Trabajo presentado en XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Casas, R. (2006). Preservar la calidad y la salud de los suelos: una oportunidad para la Argentina. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Anales; Tomo LX. Buenos Aires, Argentina., 37-38.
- Casas, R. (2015). La erosión del suelo en Argentina. En R. R. Casas y G. F. Albarracín (Eds.), *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina*. (1 ed., Vol. II, pp. 433-452). Ciudad autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina: Fundación Ciencia, Educación y Cultura. FECIC.
- Chepil, W. S. (1945). Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Science*, 60(4), 305-320.
- Cisneros, J., A. Degioanni, J. Gonzalez, C. Cholaky, A. Cantero, J. Cantero, y J. Tassile. (2015). Erosión y degradación de suelos. Provincia de Córdoba. En R. R. Casa y G. F. Albarracín (Eds.), *El deterioro del suelo y el ambiente en la Argentina* (1° ed., Vol. II, pp. 87-100). Buenos Aires: FECIC. Fundación para la Educación la Ciencia y la Cultura.
- Cisneros, J. M. (2010). *Bases para el ordenamiento territorial del sur de Córdoba (Argentina). El caso de la Cuenca de Los Arroyos Menores*. Tesis de Doctorado en Tecnología Agroambiental, Departamento de Matemática Aplicada a la Ingeniería Agronómica. Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- Cisneros, J. M., C. Cholaky, E. Bricchi, O. Giayetto, y J. J. Cantero. (1997). Evaluación del efecto del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba *Rev. Universidad Nacional de Río Cuarto*, 17 (1), 13-22.
- Cisneros, J. M., J. de Prada, A. Degioanni, A. Cantero, H. Gil, M. Reynero, . . . B. Bravo Ureta. (2004). *Erosión hídrica y cambio de uso de los suelos en Córdoba: Evaluación mediante el modelo RUSLE 2* Trabajo presentado en XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo 22-25/06/2004, Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Cisneros, J. M., O. Giayetto, C. Cholaky, G. Cerioni, A. Cantero, y M. Uberto. (2006). Suelos, rotaciones y labranzas. En E. Fernández y O. Giayetto (Eds.), *El Cultivo del*

- Maní en Córdoba* (1 ed., pp. 280). Río Cuarto, Córdoba, Argentina: Fundación de la Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Colazo, J.C., Panebianco, J.E., Del Valle, H.F., Godagnone, R.E. y Buschiazzo, D.E. (2008) Erosión eólica potencial de suelos de Argentina. Efecto de registros climáticos de distintos periodos. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Semiárido. Asociación Argentina Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis, Argentina. Disponible en: <http://www.desertificacion.gob.ar/mapa/mapas-interactivos/> (consulta: Jul. 2018).
- Colazo, J., M. Genero, C. Álvarez, y M. Vicondo. (2017). Eficiencia de control de la erosión eólica de cultivos de cobertura luego de maní en el sudoeste de Córdoba. En: Actas de las III Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y II Taller de Cartografía Digital.
- Colazo, J. C., y D. E. Buschiazzo. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159(1), 228-236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.016>
- Cosentino, D., y F. Kraemer Bherens. (2017). Fertilidad física: Descripción, fertilidad y manejo. En M. Vázquez (Ed.), *Manejo y Conservacion de Suelos. Con especial énfasis en situaciones argentinas* (pp. 386). La Plata, Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo -AACS-.
- de Dios Herrero, J. M., J. C. Colazo, y D. E. Buschiazzo. (2017). *Fracción erosionable y distribución de agregados en seco en suelos de diferente granulometría*. Trabajo presentado en III Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y II Taller Nacional de Cartografía Digital, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- de Prada, J. D., J. M. Cisneros, A. Degioanni, A. G. Cantero, H. Gil, M. Reynero, y F. A. Shah. (2004). Influencia de los sistemas de producción sobre la erosión hídrica y rendimiento del cultivo de maní. Jornada Nacional de Maní. 23 de setiembre de 2004. General Cabrera, Córdoba. AR.
- Degioanni, A., H. Gil, V. Becerra, E. Bonadeo, J. D. De Prada, J. M. Cisneros, . . . J. A. Cantero. (2013). Informe Técnico: Cultivos, Uso y Manejo de los Suelos en el sur de Córdoba. Enseñanzas de la sequía 2011-2012. Servicio de Conservación y

- Ordenamiento de Tierras (SeCyOT). (pp. 23). Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Doran, J. W., y T. B. Parkin. (1994). Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable environment. 1-21.
- Druille, M., M. Castiglioni, y J. M. Massobrio. (2013). Fracción erosionable del suelo en el oeste Bonaerense bajo sistemas de uso de la tierra contrastantes. *Ciencia del suelo*, 31(1), 125-132.
- Duval, M. E., J. A. Galantini, J. M. Martínez, F. M. López, y L. G. Wall. (2015). Evaluation of the physical quality of soils in the pampas region: effect of management practices. *Ciencias Agronomicas* (25), 33-43.
- Fiant, S., C. Alonso, P. Meriggiola, L. Fuentes, C. Spinazzé, G. Agosto, . . . R. Farías. (2015). *Estimación por teledetección de la superficie sembrada con maní campaña 2014/2015 en Córdoba, La Pampa y San Luis. (Argentina)*. Trabajo presentado en XXX Jornada Nacional de Maní. 17 de setiembre 2015, General Cabrera, Córdoba. Argentina.
- Genero, M. I. (2014). INTA Huinca Renancó: La problemática de la erosión eólica en el sur de Córdoba. Entrevista en video a cargo del INTA Marcos Juárez. Ministerio de Agroindustria. Argentina. En <http://inta.gob.ar/videos/video-la-problematika-de-la-erosion-eolica-en-el-sur-de-cordoba>. 22 de mayo de 2015.
- Genero, M. I. (2015). INTA Huinca Renancó: La problemática de la erosión eólica en el sur de Córdoba. Entrevista en video a cargo del INTA Marcos Juárez. Ministerio de Agroindustria. Argentina. En <https://inta.gob.ar/videos/video-la-problematika-de-la-erosion-eolica-en-el-sur-de-cordoba>. 22 de mayo de 2015.
- Genero, M. I. (2018). Informes Agropecuarios. Superficie sembrada para diferentes cultivos en el Dpto. Gral. Roca: Agencia de Extensión Rural INTA Huinca Renancó. MAGyA de la provincia de Córdoba. MINAGRI de la Nación.
- Genero, M. I., y J. C. Colazo. (2019). *Implantación y eficiencia de control de la erosión eólica de cultivos de cobertura luego de maní en el Sur de Córdoba*. Trabajo presentado en XXXIV Jornada Nacional del Maní, General Cabrera, Córdoba, Argentina.

- Instituto de Suelos y Agrotecnia. (1948). *La erosión eólica en la región Pampeana y plan para la conservación de los suelos*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Agricultura de la Nación.
- Iriondo, M., y D. M. Kröhling. (1995). El sistema eólico pampeano. Comunicaciones Museo Provincial de Ciencias Naturales "Florentino Ameghino", 5, 1-68.
- Jarsún, B., J. A. Gorgas, E. Zamora, H. A. Bosnero, E. Lovera, A. Ravelo, y J. Tassile. (2006). *Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba: Los Suelos. Nivel de Reconocimiento 1:500.000* Córdoba, Argentina: Agencia Córdoba Ambiente DACYT-SEM, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi.
- Ley provincial 2.139 (2005) *Ley del uso sustentable al recurso suelo*. Ministerio de la Producción. Subsecretaría de Asuntos Agrarios. Dirección de Agricultura y Ganadería. Suelos. Gobierno de la provincia de La Pampa. (2005).
- Ley provincial 10.633. (2019). *Programa de buenas prácticas agropecuarias (BPA) de Córdoba*. Córdoba, Argentina.
- Ley provincial N° IX-0315-2004 (5461). (2004). *Ley de protección y conservación de suelos* San Luis, Argentina.
- Ley provincial N° 8936. (2001). *Ley de la conservación y la prevención de degradación de los suelos*: Publicada en el Boletín oficial núm.136. 23 de julio de 2001. Secretaría de Agricultura y Ganadería de la provincia de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- López Fourcade, R., R. Clérici, C. J.M., y C. Cholaky. (2008). *Evaluación de la degradación de los suelos de la pampa medanosa frente a los cambios de uso actuales*. Trabajo presentado en XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina
- Lorda, H. O. (2009). *Incidencia económica de la degradación del suelo por erosión eólica: El caso de los sistemas productivos de la estepa pampeana semiárida*. Tesis de magister en economía agraria y administración rural, Universidad Nacional Del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- Lorda, H. O., y J. Caviglia. (2012). Incidencia económica de la degradación del suelo por erosión eólica en la Región Semiárida Pampeana. En A. Quiroga y A. Bono (Eds.), *Manual de fertilidad y evaluación de suelos* (pp. 85-100). Anguil, La Pampa, Argentina: Ediciones INTA. EEA INTA Anguil Ing. Agr. Guillermo Covas.

- Marelli, H. J. (1996). Provincia de Córdoba. *El deterioro del ambiente en la Argentina*. (pp. 519): PROSA-FECIC.
- Martellotto, E. (2014). Entrevista al Director Regional del INTA en Córdoba, Ing. Eduardo Martellotto: Problemática de erosión eólica en el SO. En <https://www.youtube.com/watch?v=ze2nbVzntY>
- MEA [Millennium Ecosystem Assessment]. (2005). Living beyond our means. Natural assets and human well-being. Statement from de board., 28. En <http://www.maweb.org/en/index.aspx>.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentos de la Provincia de Córdoba. (2010). *Distrito de Recuperación de Suelos denominado "Córdoba Eólica". Boletín oficial de la Provincia de Córdoba*. Córdoba, Argentina.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018). Informe del Estado del Ambiente (EIA) del año 2018. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/compiladoiea2018web.pdf> (Consulta 09 Nov. 2020).
- ONU. (2019). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. New York, EE.UU.
- ONU. (2020). 17 objetivos para transformar nuestro mundo. La Agenda para el Desarrollo Sostenible, from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Pengue, W. (2001). Agricultura sustentable e ingeniería genética. Los aspectos ambientales del cultivo de organismos transgénicos. *Encrucijadas. Revista de la Universidad de Buenos Aires*, 10.
- Portal de noticias del Gobierno de la provincia de Córdoba. (2014). Se creó el Registro Provincial de Lotes Cultivados de Maní Retrieved 7 de mayo de 2015
- Rice, R. J. (1983). *Fundamentos de geomorfología*. Madrid, España: Paraninfo.
- Schneider, C. F. (2005). Análisis de los patrones de deforestación en el Corredor Biogeográfico del Caldén (Córdoba, Argentina) y su relación con la distancia a caminos, mediante un Sistema de Información Geográfica. (Tesis Grado)Universidad Nacional de Córdoba.Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. 2012. Informe del Estado del Ambiente (EIA) del año 2012. Disponible en:

- https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/_informe_sobre_el_estado_del_ambiente_2012.pdf (Consulta 09 Nov. 2020).
- Shukla, M. K., R. Lal, y M. Ebinger. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194-204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
- Sierra, E., y S. Pérez. (2006). Tendencias del régimen de precipitación y el manejo sustentable de los agroecosistemas: estudio de un caso en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de Climatología*, 6.
- SIS-RIAN. (2018). Red de Información Agropecuaria Nacional. Sistema de Información Secundaria (SIS) Retrieved 26/09/2018, 2018, from <http://sis-rian.inta.gob.ar/>
- Skidmore, E. L., y J. B. Layton. (1992). Dry-soil aggregate stability as influenced by selected soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 557-561.
- Tittonel, P. (2004). El carbono orgánico de los suelos del centro de Argentina. Derivando indicadores de sustentabilidad a partir de su evolución y estado de equilibrio actual. (Tesis de Magister en Ciencias Agropecuarias), Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Tripaldi, A., M. A. Zarate, S. L. Forman, T. Badger, M. E. Doyle, y P. Ciccioi. (2013). Geological evidence for a drought episode in the western Pampas (Argentina, South America) during the early-mid 20th century. *The Holocene*, 23(12). doi: DOI: 10.1177/0959683613505338
- Tripaldi, A., M. A. Zárate, S. L. Forman, y M. Doyle. (2010). *Early-mid XX century aeolian reactivation in the western Pampas*. . Trabajo presentado en 18° International Sedimentological Congress, Mendoza, Argentina.
- Uberto, M. E., J. M. Cisneros, C. Vignolo, C. G. Cholaky, y R. R. Pedelini. (2002). Efecto de rotaciones y labranzas sobre la materia orgánica de un suelo típico del área núcleo manisera. *Jornada Nacional de Maní. 17. 2002 09 19, 19 de setiembre de 2002. General Cabrera, Córdoba. AR.*
- Vicondo, M. E., M. I. Genero, R. Haro, y J. C. Colazo. (2016, 2016). *Cultivo de cobertura post maní para controlar la erosión eólica en el S de Córdoba.*
- Viglizzo, E. F., L. V. Carreño, H. Pereyra, F. Ricard, J. Clatt, y D. Pincén. (2010). Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En E. F. Viglizzo y E. Jobbágy

- (Eds.), *Expansión Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental* (pp. 9-16). Buenos Aires, Argentina: INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Viglizzo, E. F., F. Lértora, A. J. Pordomingo, J. N. Bernardos, Z. E. Roberto, y H. Del Valle. (2001). Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 83(1), 65-81.
- Viglizzo, E. F., A. J. Pordomingo, M. G. Castro, y F. Lértora. (2003). Environmental assessment of agriculture at a regional scale in the pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 87, 169-195.
- Young, R., S. Orsin, y I. Fitzpatrick. (2015). Soil degradation: a major threat to humanity. *Sustainable food trust, a global voice for sustainable food and health*, 38.
- Zilio, J. P., H. R. Krüger, y F. D. Frolla. (2016). Indicadores de calidad de suelo en el sudoeste bonaerense. Publicaciones INTA. En:<https://inta.gob.ar/documentos/indicadores-de-calidad-de-suelo-en-el-sudoeste-bonaerense>



CAPÍTULO II

ÁREA DEL ESTUDIO: LA REGIÓN DE LA PAMPA MEDANOSA

1. Localización geográfica

La región de estudio corresponde a una de las 22 regiones naturales definidas para la provincia de Córdoba en función de sus aspectos geomórficos, estructurales y de vegetación (Cabido *et al.*, 2003b; Jarsún *et al.*, 2006). La extensión de la provincia de Córdoba comprende en su totalidad una superficie de 16.532.100 hectáreas en el centro de Argentina y, como consecuencia de su ubicación transicional entre gradientes climáticos, topográficos, materiales originarios y tipos de vegetación, posee una gran diversidad de ambientes (Cisneros *et al.*, 2015).

La *Pampa Medanosa* consta de 1.416.000 hectáreas, aproximadamente, las que representan el 8,6 % de la superficie total de la provincia. Se localiza hacia el suroeste e incluye el sur del Departamento Río Cuarto y casi por completo el Departamento General Roca. Limita al este con la Pampa arenosa anegable, al noroeste con la Pampa Arenosa Alta, al oeste con la provincia de San Luis y al sur con la provincia de La Pampa (Figura 1).

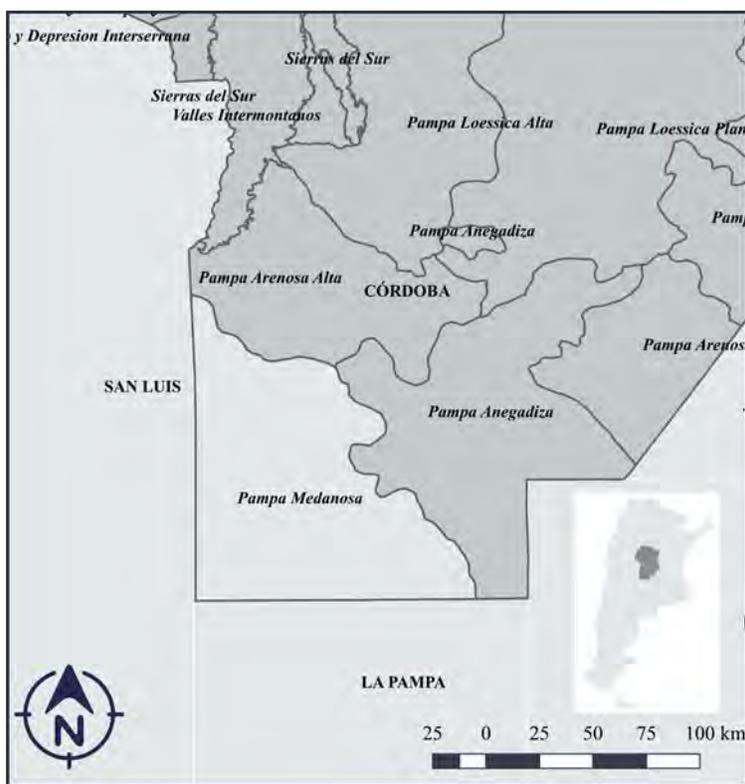


Figura 1. Región de la Pampa Medanosa. Adaptado de Cabido *et al.* (2003b).

2. Síntesis climática

El clima de la región de la Pampa Medanosas es templado subhúmedo a semiárido, resultante de diversos factores, principalmente geográficos, y se enmarca en la reconocida Región Pampeana Semiárida Argentina (RPSA) (Cantero *et al.*, 1998; Jarsún *et al.*, 2006).

Respecto de las temperaturas, presenta una variación de la duración del día entre el invierno y el verano no muy marcadas, contribuyendo a disminuir la amplitud térmica anual. Percibe además el efecto de la oceanidad, que determina la atenuación de los extremos térmicos anuales. Sin embargo, en la *Pampa Medanosas*, ocurre la mayor amplitud térmica anual de la provincia, sin superar los 16°C (Jarsún *et al.*, 2006). Según datos del Servicio Meteorológico Nacional (2019) correspondientes a la estación meteorológica más cercana de INTA (Gral. Pico, La Pampa), pertenecientes a la serie 1981-2010, la temperatura media anual es de 16,2°C, la temperatura media del mes más cálido es de 23,8 °C (enero) y la temperatura media del mes más frío 8,1 °C (julio). Dichos valores de temperaturas y su amplitud (15,7 °C), son característicos de un clima templado.

Por otra parte, respecto a la temperatura de la superficie del suelo en esta región, los registros indican que es superior a la alcanzada en el sector oriental de la provincia, consecuencia de una menor cobertura vegetal y una menor capacidad calórica (Jarsún *et al.*, 2006).

En cuanto a la distribución de las precipitaciones, el régimen pluviométrico se corresponde con aquel definido para el sudeste de Sudamérica y es del tipo monzónico (Nicholson, 2011; Marengo *et al.*, 2012); por lo tanto, la mayor parte de las lluvias se concentran en el semestre cálido. En las Figuras 2 (a y b) se presenta la distribución de precipitaciones en dos localidades próximas a la región de estudio de las cuales se tiene disponible una serie de datos de 30 años, con precipitaciones medias anuales de 705,9 mm. año⁻¹ en el hacia el norte en la localidad de Villa Reynolds (San Luis) y con 891,8 mm. año⁻¹ en la localidad de Gral. Pico (La Pampa).

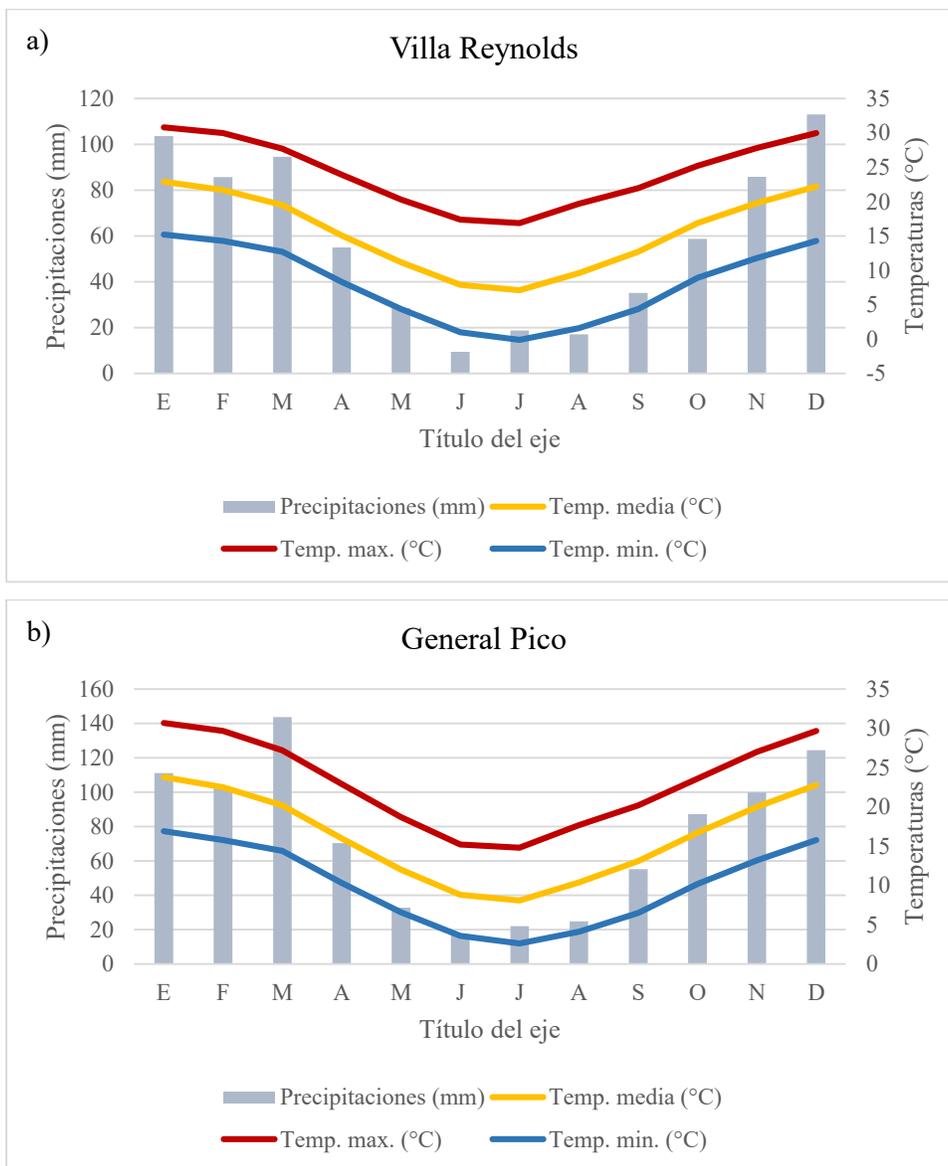


Figura 2. Distribución anual de las precipitaciones, temperaturas máximas, medias y mínimas. Adaptación de Datos Climáticos de la serie 1981-2010 para las localidades de a) Villa Reynolds, San Luis y b) General Pico, La Pampa (Servicio Meteorológico Nacional, 2019).

El comportamiento estacional es inducido por dos centros anticiclónicos semipermanentes, localizados próximos al continente sudamericano hacia los 30° de latitud sur con influencia sobre el continente; uno sobre el océano Pacífico y otro sobre el océano Atlántico. Durante el invierno ambos centros se posicionan hacia el norte y tienden a unirse

sobre el continente, mientras que, en el verano, se desplazan hacia el sur paralelamente formándose entre ellos un centro de baja presión. Esto genera un flujo de vapor de agua que ingresa desde el norte, responsable de las lluvias del centro y norte de Argentina, principalmente situadas entre octubre y marzo (Jarsún *et al.*, 2006; De Ruyver, 2015). Como se aprecia en la Figura 3, las precipitación media anual disminuye de este a oeste. Lo inverso ocurre con la evapotranspiración potencial que se incrementa hacia el oeste y, por lo tanto, se produce un aumento de la deficiencia hídrica en el mismo sentido (Jarsún *et al.*, 2006).

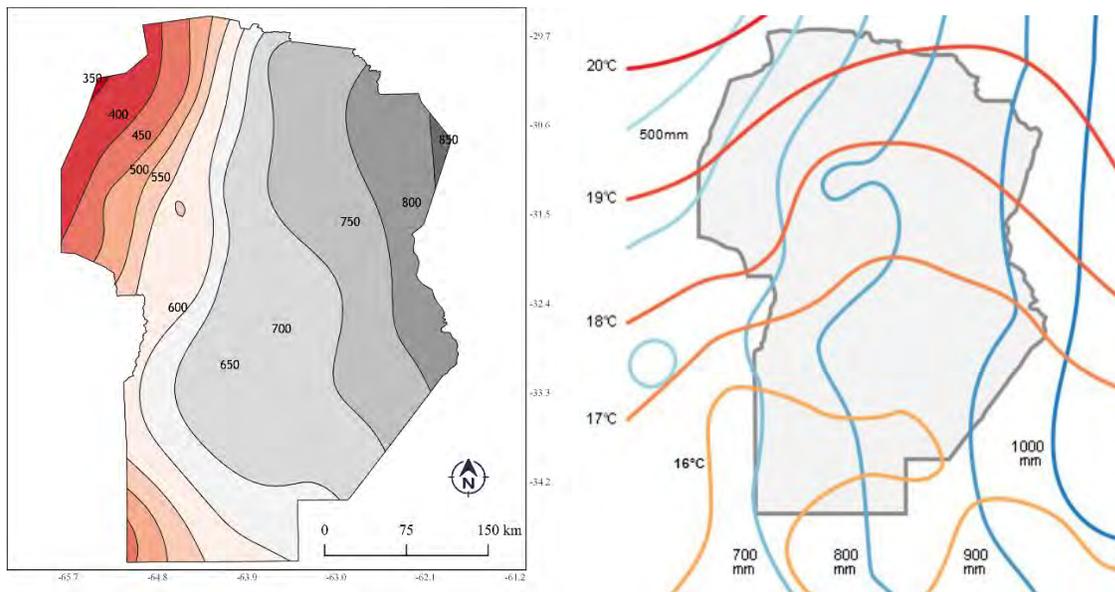


Figura 3. Precipitación media anual (mm) correspondientes a la serie 1950-2000. Adaptado de WorldClim.org (2010) (Izquierda). (Derecha) Valores medios anuales de precipitación caída en la provincia de Córdoba, entre 2001 y 2010. Oliva (2014).

En la Figura 3 (izquierda) pueden verse las isohietas definidas para la serie 1950-2000, que indicaban precipitaciones medias anuales de entre 500 y 600 mm para el área que comprende la Pampa Medanosa. En un estudio realizado recientemente por la Universidad Nacional de Córdoba se analizaron los datos de temperatura y precipitaciones registrados por el Servicio Meteorológico Nacional entre 1941 y 2010, para las provincias de Córdoba, San Luis, Santa Fe, La Rioja, La Pampa y Buenos Aires; y se determinó la ocurrencia de un corrimiento en las isohietas (Figura 3, derecha). Los autores determinaron que en el 60% del

territorio la lluvia anual aumentó (Oliva, 2014). Esta es una de las causas que varios autores mencionan al explicar el avance de la frontera agropecuaria observado en las últimas décadas (Viglizzo *et al.*, 1995; Oliva, 2014). Puede observarse que la isohieta de los 700 mm se halla sobre el límite oeste de la Pampa Medanosa, y que sobre su límite este, la surca la isohieta de los 800mm. En concordancia con ello, la precipitación media anual para la serie 1981-2010 estimada para la localidad de Gral. Pico, La Pampa (35°40'00"S 63°44'00"O) fue de 892 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2019).

Finalmente, respecto a la circulación atmosférica, el desplazamiento de las masas de aire ocurre principalmente en sentido NE-SO determinada por la influencia del cordón serrano (Jarsún *et al.*, 2006). Los vientos de mayores velocidades se registran entre los meses de agosto y diciembre, con una media mensual para cada uno de los meses de este período que fluctúa alrededor de 4 m/s (Figura 4).

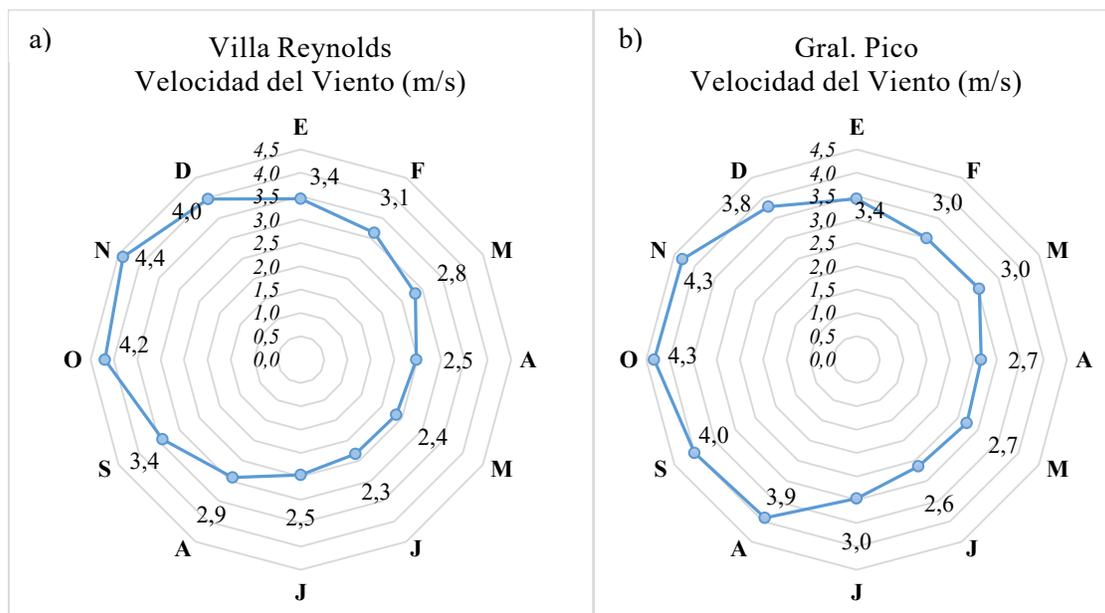


Figura 4. Velocidad media mensual del viento (m/s). Datos de la serie 1981-2010 para las localidades a) Villa Reynolds, San Luis y b) Gral. Pico, La Pampa (Servicio Meteorológico Nacional, 2019).

3. Breve descripción de la vegetación original

La *Pampa Medanosa* pertenece a la provincia fitogeográfica del Espinal, su vegetación nativa dominante es el bosque xerófilo bajo, denso o abierto, de un solo estrato, alternado con sabanas gramíneas y estepas. Dentro de esta gran provincia, el área de estudio, se enmarca en el Distrito del Caldén (*Prosopis caldenia* B.), además de esta especie endémica también incluye “Algarrobos” (*Prosopis nigra*, *Prosopis flexuosa*), “Sombra de toro” (*Jodina rhombifolia*), “Incienso” (*Schinus fasciculatus*) y “Chañar” (*Geoffroea decorticans*); entre otras (Apodaca *et al.*, 2015).

Dentro de la región del estudio existe un gradiente en cuanto a la densidad y presencia del monte nativo; disminuyendo desde el oeste hacia el este hasta perderse entre los pastizales y tierras agrícolas (Cisneros *et al.*, 2002; Schneider, 2005). Existe evidencia de que este gradiente estuvo presente desde antes de la transformación del paisaje por las actividades agropecuarias. Aunque con superficie mayor que la actual, y con una concentración de monte sobre las laderas del Río Quinto, hacia el oeste de del Campillo y en la zona de la laguna La Amarga (Escudero, 2005; Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2007; Pérez Zavala *et al.*, 2017). Esta variación de la vegetación probablemente haya tenido impacto sobre la mayor formación de molisoles hacia el este de la región.

4. Caracterización del relieve regional

Geomorfológicamente, la región es una extensa planicie cubierta por campos de dunas que se continúan hacia las provincias de San Luis y La Pampa que determinan un relieve ondulado a suavemente ondulado, surcado por lomas medianosas, con una leve pendiente que disminuye desde el noroeste hacia el sureste (Cantú y Degiovanni, 1984; Jarsún *et al.*, 2006). En el sector norte se encuentra el campo de dunas de Laguna Oscura, cuya dirección de génesis fue NNE-SSO (Cantú, 1992). Sobre el sector sur, existe un sistema de dunas longitudinales de orientación SSE-NNO con sus corredores de deflación ocupados por lagunas, bañados y playas salinas. Los cuerpos lagunares alargados se encadenan en estas

depresiones con dirección de drenaje hacia el sudeste donde el relieve se muestra plano a plano-cóncavo (Cantú y Degiovanni, 1984; Degiovanni *et al.*, 2005).

La red de drenaje está conformada por el río Popopis (Quinto) y por algunos pequeños cursos semipermanentes parcialmente sepultados por sedimentos arenosos eólicos hacia el sudoeste. Las tierras del este de la región actúan como receptoras de escurrimientos y sedimentos, contribuyendo al desarrollo de sus suelos no sólo por el aporte de agua, sino también, por los sedimentos que lo enriquecen; al mismo tiempo siendo perjudicados por el aporte de sales solubles, estos procesos se intensifican en la transición con la *Pampa Medanosa Anegable* (Jarsún *et al.*, 2006).

5. Los suelos predominantes y su material de génesis

La *Pampa Medanosa*, está constituida principalmente sobre materiales de origen eólico arenosos y franco arenosos de origen eólico (Jarsún *et al.*, 2006). Se extiende sobre el ambiente geomorfológico *Planicie Arenosa Eólica del Sur* definida por Carignano *et al.* (2014), en el extremo norte del *Mar de Arena Pampeano* [MAP]; núcleo del extenso Sistema Eólico Pampeano [SEP] (Iriondo y Kröhling, 1995).

La evolución del paisaje en esta región se produjo fundamentalmente por la acción de cuatro procesos ocurridos durante en el Cuaternario tardío: deflación, disipación de dunas, desarrollo de fajas fluviales y pedogénesis; determinados por una secuencia de episodios áridos y húmedos (Cantú y Degiovanni, 1984; Iriondo y Kröhling, 1995).

En coherencia con su historia genética, la Planicie Arenosa Eólica del Sur sobre la que se encuentra la región objeto de este estudio, se caracteriza por la presencia de grandes formas de deflación, campos de dunas y mantos de arena que se sobre imponen a las geoformas fluviales de los ríos Popopis y Chocancharava conformando un complejo ambiente de interferencia eólico-fluvial (Carignano *et al.*, 2014). La mayor parte de estas formas medianosas están parcialmente estabilizadas y las cubetas de deflación que se forman entre

ellas, generalmente están ocupadas por lagunas permanentes o semipermanentes (Cantero *et al.*, 1998).

Existe un gradiente textural en el material parental, desde arenoso hacia franco arenoso en dirección SO-NE hasta la transición con la faja periférica de loess donde se concentraron sedimentos más finos transportados por suspensión, en forma de polvo atmosférico y nubes de cenizas volcánicas (Iriondo y Kroling, 1995).

Los órdenes de suelos predominantes en la región (Figura 5) según la clasificación Soil Taxonomy (USDA, 2014) son Molisoles (53%), Entisoles (43%) (Cabido *et al.*, 2003b).

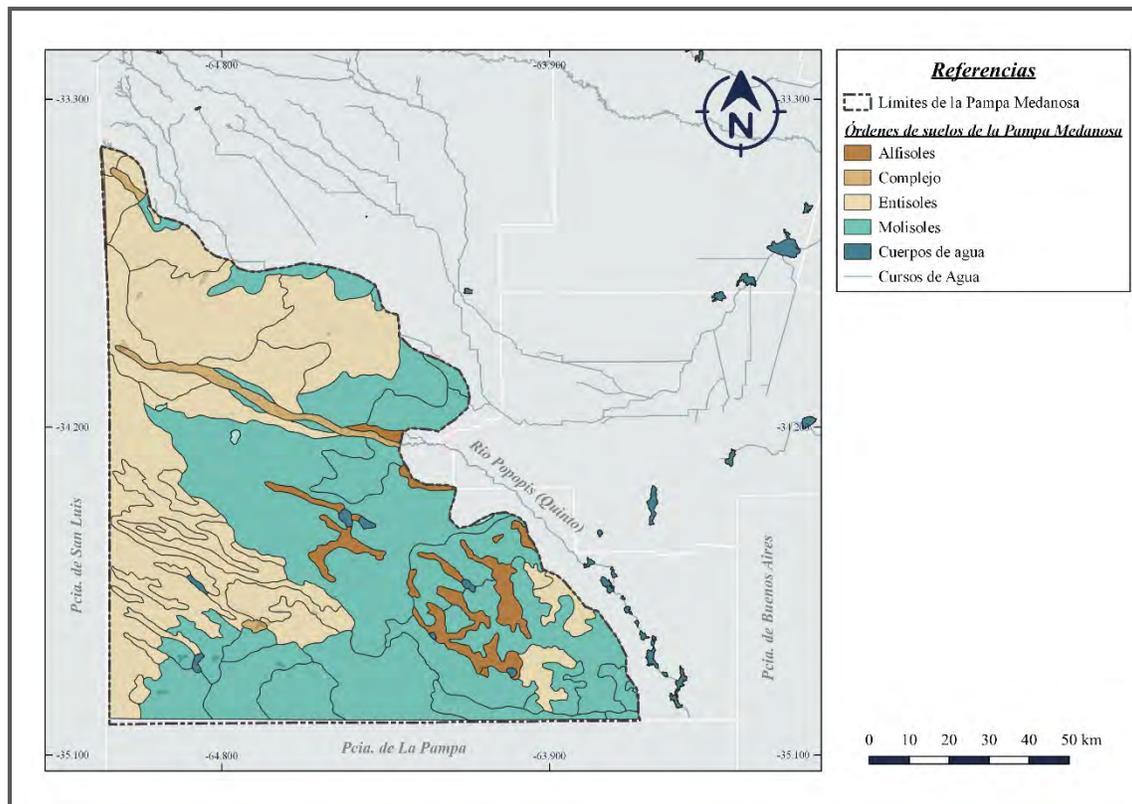


Figura 5. Órdenes de suelos presentes en la Pampa Medanosa. Adaptado de Mapa de suelos de Gorgas *et al.* (2011) - Red hidrográfica de Masciángelo (2014).

Hacia el norte del río Popopis, la dinámica erosiva es muy alta, con acumulaciones de médanos activos (Ustorthents típicos) principalmente en la zona de Washington y Laguna

Oscura. Hacia el sur de Villa Huidobro y Huinca Renancó se han desarrollado las formas más estables del relieve y los suelos de mayor aptitud de la unidad prevaleciendo Haplustoles énticos y típicos. Hacia el oeste los suelos predominantes menos evolucionados, con materiales más gruesos, de menor productividad y mayor susceptibilidad a la erosión eólica (Ustipsamments típicos) (Cabido *et al.*, 2003b). Los regímenes de temperaturas y humedad reportados para estos suelos por Van Wambeke y Scoppa (1980) son térmicos y ústicos (Figura 6).

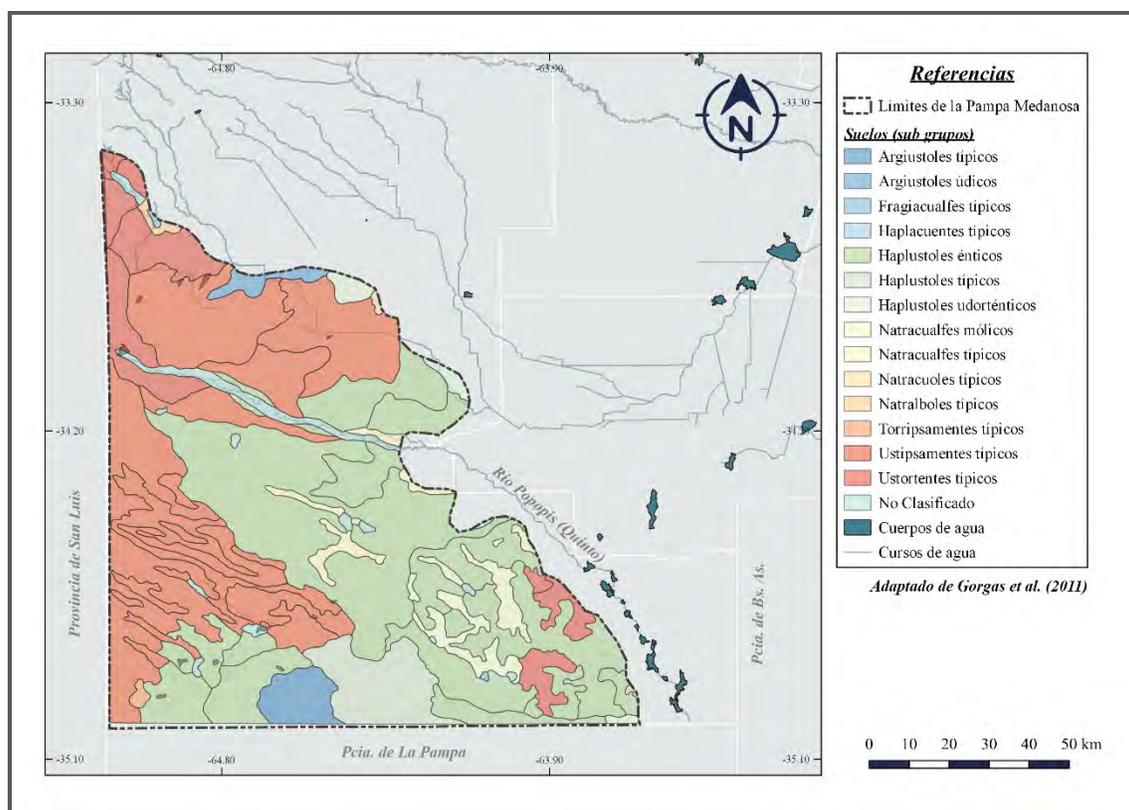


Figura 6. Distribución de los suelos predominantes en la región. Adaptado de Mapa de suelos de Gorgas *et al.* (2011) - Red hidrográfica de Masciángelo (2014).

Aquellos que ocupan mayor superficie y representan la generalidad de la región se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1. Distribución de la superficie entre los suelos predominantes en la Pampa Medanosa Cordobesa*.

Orden	Subgrupo	Superficie (ha)
Molisoles	Haplustoles énticos	734.720
	Haplustoles típicos	76.500
Entisoles	Ustipsamments típicos	578.185
	Ustorthents típicos	141.247

*Adaptado de Cabido *et al.* (2003a).

5.1. Descripción de los suelos predominantes de la región de la Pampa Medanosa

Los principales suelos de la región bajo uso agropecuario son tres: Haplustoles énticos y típicos y Ustipsamments típicos. Para la descripción de cada uno de ellos se seleccionaron perfiles modales de suelos pertenecientes series que, dada su distribución, fueran representativas de la generalidad regional.

Estas series fueron:

- ❖ Serie El Veintitrés
- ❖ Serie El Yarará
- ❖ Serie Huinca Renancó
- ❖ Serie Del Campillo
- ❖ Serie Ea. Las Mercedes
- ❖ Serie Italó
- ❖ Serie Villa Huidobro

5.1.1. Haplustol éntico franco mixto término (Serie El Veintitrés, Hoja 3563-13 Huinca Renancó)

El perfil típico de la Serie El Veintitrés, fue descripto a 21,6 km al Norte de Huinca Renancó, departamento General Roca, provincia de Córdoba. Está representado por un suelo algo excesivamente drenado, cuya génesis ha ocurrido sobre materiales franco arenosos. Es un suelo que aparece en lomas muy suavemente onduladas y concavidades del meso-relieve con pendientes próximas al 0,5%.

Su horizonte superficial “A” es de color pardo grisáceo muy oscuro a pardo oscuro (10YR3/2,5), de textura franco arenosa (64 a 70% de arena y 8,5 a 11,4% de arcilla) y estructura en bloques subangulares débiles. Bajo este horizonte se halla un horizonte de transición al material originario “AC” con una estructura en bloques subangulares débiles con tendencia a masivo. El material de origen se encuentra a una profundidad de 45 cm y es de textura franco arenosa con carbonatos en profundidad (Tabla 2).

Estos suelos son considerados aptos para agricultura, sin embargo, sus limitaciones climáticas y su débil estructuración superficial hacen que sean moderadamente susceptibles a la erosión eólica (Cartas de Suelos de Córdoba, Hoja 3563-Huinca Renancó 1:50.000¹).

Tabla 2. Datos Analíticos de la Serie El Veintitrés. Hoja 3563-13 Huinca Renancó 1:50.000. Situación: Latitud: 34°37'55” S Longitud: 64°24'33” O Altitud: 193 m.s.n.m. (Cartas de Suelos de Córdoba).

Horizonte	A	AC	C
Profundidad de la muestra (cm)	0-17	17-45	45 a +
Materia Orgánica (%)	1,55	0,86	s/d
Carbono Orgánico (%)	0,90	0,50	s/d
Nitrógeno total (%)	0,109	0,062	s/d

¹Hoja 3563-13 Huinca Renancó, Serie El Veintitrés.
<http://suelos.cba.gov.ar/HUINCARENANCO/index.html#ELVEINTITRES>

Relación C/N		8,2	8,0	s/d
Arcilla, 2 μ (%)		10,0	9,8	8,8
Limo, 2-50 μ (%)		25,5	23,3	21,7
Arena muy fina, 50-100 μ (%)		29,8	35,7	37,5
Arena fina, 100-250 μ (%)		32,5	29,3	29,4
Arena media, 250-500 μ (%)		1,8	1,4	1,3
Arena gruesa, 500-1000 μ (%)		1,2	1,0	1,0
Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)		0,1	-	-
Calcáreo, CaCO ₃ (%)		0,0	0,0	0,08
Equivalente de humedad (%)		12,8	11,5	10,8
pH en pasta		5,7	6,7	7,1
pH en agua 1:2,5		6,1	6,9	7,3
Cationes de intercambio (meq/100 gr):	Ca ⁺⁺	7,3	7,5	-
	Mg ⁺⁺	0,9	0,6	-
	Na ⁺	0,3	0,1	0,3
	K ⁺	1,9	1,5	0,8
	H ⁺	0,9	0,7	0,3
Sodio de intercambio, % (PSI)		2,5	1,0	3,3
Suma de bases, meq/100 gr (S)		10,8	9,7	-
Capacidad de intercambio catiónico me/100 gr (T)		11,9	10,5	9,2
Saturación con bases, % (S/T)		91	92	-

5.1.2. Haplustol éntico, franco grueso, mixto, térmico (Serie El Yará, Hoja 3563-13 Huinca Renancó)

El perfil típico de la Serie El Yará, fue estudiado a 16,2 km al Norte de Del Campillo y se describe a continuación. Corresponde a un suelo algo excesivamente drenado, desarrollado sobre materiales franco arenosos a arenosos francos finos. Se presenta vinculado a lomas ligeramente onduladas, sin superar el 1% de pendiente. El horizonte “A” tiene 18 cm de espesor, es de color pardo grisáceo oscuro (10YR3/2), de textura franco arenosa a arenosa franca (con un contenido de arenas de 70 a 75% y un contenido de arcillas de 8,5 a 10%) y estructura en bloques subangulares débiles. Gradualmente el horizonte “A” pasa al material originario de textura arenoso franca a través de un horizonte de transición “AC”. El material calcáreo se encuentra muy profundo (Tabla 3).

Estos suelos son aceptados como aptos para agricultura, aunque su uso se encuentra limitado por el clima, por la baja retención de humedad y por la susceptibilidad moderada a la erosión eólica (Cartas de Suelos de Córdoba, Hoja 3563-13 Huinca Renancó 1:50.000²).

Tabla 3. Datos Analíticos de la Serie El Yará. Hoja 3563-13 Huinca Renancó 1:50.000. Situación: Latitud: 34°13'34" S Longitud: 64°28'04" O Altitud: 239 m.s.n.m. (Cartas de Suelos de Córdoba).

Horizonte	A	AC	C
Profundidad de la muestra (cm)	0-18	18-43	43 a +
Materia Orgánica (%)	1,59	1,02	s/d

²Hoja 3563-13 Huinca Renancó, Serie El Yará. 1:50.000
<http://suelos.cba.gov.ar/HUINCARENANCO/index.html#ELYARARA>

Carbono Orgánico (%)		0,93	0,59	s/d
Nitrógeno total (%)		0,111	0,068	s/d
Relación C/N		8,4	8,7	s/d
Arcilla, <2 μ (%)		9,0	7,3	6,9
Limo, 2-50 μ (%)		17,2	15,0	13,0
Arena muy fina, 50-100 μ (%)		47,3	52,2	55,3
Arena fina, 100-250 μ (%)		24,6	24,3	23,1
Arena media, 250-500 μ (%)		1,4	0,8	0,7
Arena gruesa, 500-1000 μ (%)		0,5	1,0	1,2
Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)		-	-	-
Carbonatos, CaCO ₃ (%)		0,0	0,0	0,0
Equivalente de humedad (%)		11,3	9,8	8,3
pH en pasta		5,3	5,9	7,0
pH en agua (1:2,5)		5,6	6,3	7,1
Cationes de intercambio, meq/100 gr:	Ca ⁺⁺	6,9	5,5	5,1
	Mg ⁺⁺	0,4	0,5	0,8
	Na ⁺	0,2	0,2	0,2
	K ⁺	1,6	1,6	1,1
	H ⁺	1,8	1,0	0,5
Sodio de intercambio, % (PSI)		1,8	2,3	2,3
Suma de bases, meq/100 gr (S)		9,1	7,8	7,1

Capacidad de intercambio catiónico, meq/100 gr (T)	11,0	8,8	7,5
Saturación con bases, % (S/T)	83	89	95

5.1.3. Ustipsamment típico, arenoso, mixto, térmico (Serie Huinca Renancó, Hoja 3563-13 Huinca Renancó)

El perfil típico correspondiente a un Ustipsamment típico de la Serie Huinca Renancó fue descrito a 15,3 km al NNO de la ciudad de Huinca Renancó, departamento General Roca, provincia de Córdoba. Esta serie está representada por un suelo algo a excesivamente drenado, cuya génesis ha ocurrido sobre materiales arenosos vinculados a aquellas lomas cuyas pendientes exceden un 1% en su gradiente dando relieves o meso relieves convexos.

El horizonte de este Ustipsamment “A”, de 21 cm de espesor, es de color pardo oscuro (10YR3/3), textura arenoso franca y estructura en bloques muy débiles a masiva (Arena: 71-80%; arcilla: menos de 8%). Seguido de este horizonte, presenta un horizonte de transición “AC”, arenoso franco y masivo. El horizonte C, material originario, se halla a 43 cm de profundidad y su textura es areno-franca. El material calcáreo se encuentra habitualmente por debajo de los dos metros de hondura (Tabla 4).

Estos suelos están en el límite del uso agrícola, siendo sus principales limitaciones el clima, la baja retención de humedad y el grave peligro de erosión eólica (Cartas de Suelos de Córdoba, Hoja 3563-13 Huinca Renancó 1:50.000³).

³ Cartas de Suelos de Córdoba. Serie Huinca Renancó Hoja 3563-13 Huinca Renancó 1:50.000
<http://suelos.cba.gov.ar/HUINCARENANCO/index.html#HUINCARENANCO>

Tabla 4. Datos Analíticos de la Serie Huinca Renancó. Hoja 3563-13 Huinca Renancó 1:50.000. Situación: Latitud: 34°41'40" S Longitud: 64°25'15" O Altitud: 195 m.s.n.m. (Cartas de Suelos de Córdoba).

Horizonte	A	AC	C	
Profundidad de la muestra (cm)	0-21	21-43	43 a +	
Materia Orgánica (%)	1,26	0,86	s/d	
Carbono Orgánico (%)	0,73	0,50	s/d	
Nitrógeno total (%)	0,085	0,054	s/d	
Relación C/N	8,6	9,2	s/d	
Arcilla, <2 μ (%)	6,9	6,5	5,7	
Limo, 2-50 μ (%)	16,5	15,3	16,1	
Arena muy fina, 50-100 μ (%)	36,3	40,8	40,6	
Arena fina, 100-250 μ (%)	37,4	34,5	35,3	
Arena media, 250-500 μ (%)	1,9	1,1	1,0	
Arena gruesa, 500-1000 μ (%)	3,0	1,5	1,4	
Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)	0,0	0,4	0,2	
Carbonatos, CaCO ₃ (%)	0,0	0,0	0,0	
Equivalente de humedad (%)	8,8	7,8	7,1	
pH en pasta	5,5	6,2	7,0	
pH en agua (1:2,5)	5,7	6,3	7,2	
Cationes de intercambio, meq/100 gr:				
	Ca ⁺⁺	4,7	5,9	5,6
	Mg ⁺⁺	0,7	0,2	0,7

	Na ⁺	0,2	0,2	0,1
	K ⁺	1,6	1,3	0,6
	H ⁺	1,4	0,7	0,4
Sodio de intercambio, % (PSI)		2,3	2,4	1,4
Suma de bases, meq/100 gr (S)		7,2	7,6	6,8
Capacidad de intercambio catiónico, meq/100 gr (T)		8,8	8,2	7,2
Saturación con bases, % (S/T)		81,8	92,7	94,4

5.1.4. Ustipsamment típico, arenoso, mixto, térmico (Serie Del Campillo, Hoja 3563-7 Del Campillo)

La serie Del Campillo está representada por un suelo algo excesivamente drenado, desarrollado sobre materiales de texturas gruesas, areno-francos. Se vinculan a lomas con pendientes menores a 1%. El perfil típico de la serie Del Campillo fue estudiado a 3,7 km al noroeste de la localidad homónima, departamento General Roca, provincia de Córdoba.

El horizonte superior “A” presenta 20 cm de espesor, es de color pardo grisáceo muy oscuro a pardo oscuro (10YR3/2,5). Su textura es franco-arenosa a areno-franca, con un 8% de arcilla y un 75% de arenas. Su estructura presenta bloques débiles con tendencia a un comportamiento masivo. Debajo de este existe un horizonte transicional “AC” que gradualmente da lugar al material originario, este se encuentra a una profundidad de 46 cm y su textura es areno-franca. El material calcáreo se halla muy profundo (Tabla 5).

Los suelos de esta serie presentan baja retención de humedad y una estructura superficial débil, todo ello determina una moderada a severa susceptibilidad a la erosión

eólica, limitando considerablemente su aptitud (Cartas de Suelos de Córdoba, Hoja 3563-7 Del Campillo 1:50.000⁴).

Tabla 5. Datos Analíticos de la Serie Del Campillo. Hoja 3563-7 Del Campillo 1:50.000. Situación: Latitud: 34°21'30" S Longitud: 64°31'00" O. Altitud: 233 m.s.n.m. (Cartas de Suelos de Córdoba).

Horizonte	A	AC	C
Profundidad de la muestra (cm)	0-20	20-46	46 a +
Materia Orgánica (%)	0,97	0,54	-
Carbono Orgánico (%)	0,56	0,31	-
Nitrógeno total (%)	0,079	0,049	-
Relación C/N	7,1	6,3	-
Arcilla, 2 μ (%)	8,4	6,5	6,5
Limo, 2-50 μ (%)	16,2	15,4	15,2
Arena muy fina, 50-100 μ (%)	42,6	46,4	45,2
Arena fina, 100-250 μ (%)	25,7	26,0	26,9
Arena media, 250-500 μ (%)	3,4	3,2	3,2
Arena gruesa, 500-1000 μ (%)	4,8	3,8	4,0

⁴ Cartas de Suelos de Córdoba. Serie Del Campillo Hoja 3563-7 Del Campillo 1:50.000
<http://suelos.cba.gov.ar/DELCAMPILLO/index.html>



Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)		0,0	0,0	0,0
Calcáreo, CaCO ₃ (%)		0,0	0,0	0,0
Equivalente de humedad (%)		14,4	8,1	7,3
pH en pasta		5,9	6,7	7,4
pH en agua 1:2,5		6,0	6,6	7,4
Cationes de intercambio (meq/100 gr):	Ca ⁺⁺	3,8	4,6	5,4
	Mg ⁺⁺	0,6	0,7	0,7
	Na ⁺	0,1	0,04	0,1
	K ⁺	1,7	1,5	0,4
Suma de bases, meq/100 gr (S)		6,2	6,8	6,6
H ⁺ de cambio (meq/100 gr)		1,0	0,5	0,1
Capacidad de intercambio catiónico meq/100 gr (T)		7,2	7,3	6,7
Sodio de intercambio, % (PSI)		1,4	0,6	1,5
Saturación con bases, % (S/T)		86	93	98

5.1.5. Ustipsamment típico, franco grueso (Serie Ea. Las Mercedes, Hoja 3563-8-3
Jovita)

El perfil típico que representa los suelos de este tipo fue descripto a 19,4 Km al ONO de Villa Rossi, departamento Presidente Roque Sáenz Peña, provincia de Córdoba.

La Serie Ea. Las Mercedes corresponde a un suelo algo excesivamente drenado que se ha desarrollado sobre materiales de textura franca, vinculados a lomas arenosas.

El horizonte “A” alcanza 17 cm de espesor, con un color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo. Su textura es areno-franca con un 7,5% de arcilla y 76% de arenas. La estructura que presenta es en bloques subangulares débiles con una tendencia a masiva. Es un suelo muy pobre en cuanto a contenido de materia orgánica. El perfil muestra un horizonte de transición entre el “A” y el material originario u horizonte “C”, de textura arenosa franca a arenosa y masiva (Tabla 6).

La baja retención de humedad y el drenaje interno algo excesivo, acentúan las limitaciones climáticas (Cartas de Suelos de Córdoba, Hoja 3563-8-3 Jovita 1:50.000⁵).

Tabla 6. Datos Analíticos de la Serie Estancia Las Mercedes. Hoja 3563-8-3 Jovita 1:50.000. Situación: Latitud: 34°14'S Longitud: 63°27'O. Altitud: 136 m.s.n.m. (Cartas de Suelos de Córdoba).

Horizonte	A	AC	C
Profundidad de la muestra (cm)	0-17	17-42	42 a +
Materia Orgánica (%)	1,37	0,68	-
Carbono Orgánico (%)	0,81	0,44	-
Nitrógeno total (%)	0,10	0,07	-
Relación C/N	8,1	6,3	-
Arcilla, <2 μ (%)	7,5	7,7	7,3

⁵ Cartas de Suelos de Córdoba. Serie Estancia Las Mercedes. Hoja 3563-8-3 Jovita 1:50.000. <http://suelos.cba.gov.ar/JOVITA/index.html#LASMERCEDES>

Limo, 2-50 μ (%)		16,5	15,9	11,9
Arena muy fina, 50-100 μ (%)		56,9	46,9	76,4
Arena fina, 100-250 μ (%)		19,6	29,1	4,8
Arena media, 250-500 μ (%)		0,1	0,1	0,1
Arena gruesa, 500-1000 μ (%)		0,2	0,1	0,2
Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)		-	-	-
Calcáreo, CaCO ₃ (%)		0,0	0,0	0,0
Equivalente de humedad (%)		9,2	9,0	7,1
pH en pasta		5,6	6,2	6,7
pH en agua 1:2,5		5,7	6,3	6,8
Cationes de intercambio (me/100 gr):	Ca ++	4,8	5,7	5,6
	Mg ++	0,7	1,0	0,7
	Na +	0,2	0,1	0,3
	K +	1,8	1,3	0,6
	H +	1,9	1,1	0,5
Suma de bases, me/100 gr (S)		7,5	8,1	7,2
Capacidad de intercambio catiónica me/100 gr (T)		9,4	9,0	7,5
Saturación con bases, % (S/T)		80	90	96

5.1.6. Haplustol típico, franco, grueso (Serie Italó, Hoja 3563-14 Buchardo)

La Serie Italó es un suelo bien drenado a algo excesivamente drenado, desarrollado sobre materiales francos arenosos, vinculados a lomas arenosas ligeramente onduladas con pendientes del 1%.

El horizonte superficial “A” de estos suelos consta de 24 cm de espesor, su color en húmedo es pardo grisáceo oscuro (10YR3/2,5). Su textura es franco-arenosa con un 60-65% de arenas y 8-11% de arcillas. Su estructura en bloques moderados, duros en seco. Debajo del horizonte “A”, se presenta un horizonte B no textural, cuyo color es pardo oscuro (10YR3/3). En este horizonte el contenido de arcillas asciende a 10-13%. Su estructura está caracterizada por prismas y bloques medios débiles con vestigios de barnices muy finos. El horizonte C, correspondiente al material originario, se encuentra a una profundidad de 57 cm, es de color pardo amarillento oscuro (10YR3,5/4), textura franco arenosa (68-74% de arenas y 8% de arcillas o menos. A partir de los 95 cm de profundidad se observa abundante calcáreo pulverulento en la masa del suelo (Tabla 7).

Estos suelos son aptos para agricultura, aunque se encuentran limitados climáticamente. Presentan una moderada retención de humedad y moderada estructura superficial (susceptibles a la degradación física) (Cartas de Suelos de Córdoba, Hoja 3563-14 Buchardo 1:50.000⁶).

Tabla 7. Datos Analíticos de la Serie Italó. Hoja 3563-14 Buchardo 1:50.000. Situación: Latitud: 34°41’S Longitud: 63°46’W Altitud: 141 m.s.n.m. (Cartas de Suelos de Córdoba).

Horizonte	A	B	C1	C2k
Profundidad de la muestra (cm)	0-24	24-57	57-95	95 a +

⁶ Cartas de Suelos de Córdoba. Serie Italó Hoja 3563-14 Buchardo 1:50.000
<http://suelos.cba.gov.ar/BUCHARDO/index.html#ITALO>

Materia Orgánica (%)		1,94	0,62	-	-
Carbono Orgánico (%)		1,12	0,36	-	-
Nitrógeno total (%)		0,116	0,057	-	-
Relación C/N		9,6	6,3	-	-
Arcilla, 2 μ (%)		10,6	11,8	7,9	6,5
Limo, 2-50 μ (%)		27,7	24,1	24,1	23,3
Arena muy fina, 50-100 μ (%)		28,2	24,5	30,5	29,6
Arena fina, 100-250 μ (%)		27,9	35,8	32,5	34,0
Arena media, 250-500 μ (%)		2,8	1,8	1,4	3,6
Arena gruesa, 500-1000 μ (%)		2,4	2,5	2,9	2,1
Arena muy gruesa., 1-2 mm (%)		0,1	-	-	-
Calcáreo, CaCO ₃ (%)		2,2	-	-	-
Equivalente de humedad (%)		13,8	12,0	9,3	9,7
pH en pasta		6,3	6,5	7,0	7,6
pH en agua 1:2,5		6,5	6,7	7,2	7,9
Cationes de intercambio (me/100 gr):	Ca ⁺⁺	5,8	6,5	6,3	-
	Mg ⁺⁺	0,7	0,7	1,1	-
	Na ⁺	0,3	0,2	0,2	0,3
	K ⁺	2,9	1,3	0,7	1,3

	H ⁺	1,1	0,7	0,4	-
Suma de bases, me/100 gr (S)		9,7	8,7	8,3	-
Capacidad de intercambio catiónico me/100 gr (T)		10,0	9,5	8,7	7,4
Saturación con bases, % (S/T)		88	91	95	-

5.1.7. Haplustol típico, franco fino, mixto, térmico (Serie Villa Huidobro Hoja 3563-13 Huinca Renancó)

La Serie Villa Huidobro está representada por un suelo bien drenado, desarrollado sobre un material originario franco. Se vincula generalmente a lomas planas y pendientes. El horizonte “A” tiene 20 cm de espesor y su color es pardo grisáceo muy oscuro (10YR3/2). Su textura es franca con un 19,2% de arcilla y un 43,9% de arenas. La estructura muestra bloques medios, moderados y granular. Contiguo al horizonte “A” se presenta un horizonte “B_w” (cámbico) de color pardo amarillento oscuro (10YR3/4) con estructura en bloques medios, moderados, con la presencia de escasos barnices. La secuencia de horizontes es continuada por un horizonte C que representa el material originario, este se halla a 38 cm de profundidad y su textura es franca con abundante calcáreo pulverulento en la masa (Tabla 8).

Son suelos agrícolas, con moderado contenido de materia orgánica y buena retención de humedad, siendo el clima su principal limitación (Cartas de Suelos de Córdoba, Hoja 3563-13 Huinca Renancó 1:50.000⁷).

⁷ Cartas de Suelos de Córdoba. Serie Huinca Renancó Hoja 3563-13 Huinca Renancó. 1:50.000
<http://suelos.cba.gov.ar/HUINCARENANCO/index.html#VILLAHUIDOBRO>

Tabla 8. Datos Analíticos de la Serie Villa Huidobro. Hoja 3563-13 Huinca Renancó 1:50.000. Situación: Latitud: 34°54'S Longitud: 64°39'O Altitud: 251 m.s.n.m. (Cartas de Suelos de Córdoba).

Horizonte	A	B _w	C _k	
Profundidad de la muestra (cm)	0-20	20-38	38 a +	
Materia Orgánica (%)	1,79	0,89	-	
Carbono Orgánico (%)	0,98	0,52	-	
Nitrógeno total (%)	0,095	0,073	-	
Relación C/N	10,3	7,1	-	
Arcilla, <2 μ (%)	19,8	20,8	16,7	
Limo, 2-50 μ (%)	36,9	37,3	37,9	
Arena muy fina, 50-100 μ (%)	18,1	18,6	19,3	
Arena fina, 100-250 μ (%)	23,4	23,3	25,5	
Arena media, 250-500 μ (%)	1,1	0,9	1,2	
Arena gruesa, 500-1000 μ (%)	1,1	1,0	1,0	
Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)	-	-	-	
Carbonatos, CaCO ₃ (%)	0,0	0,0	4,27	
Equivalente de humedad (%)	22,8	21,2	20,2	
pH en pasta	6,1	6,8	7,7	
pH en agua (1:2,5)	6,4	7,2	8,0	
Cationes de intercambio, meq/100 gr:				
	Ca ⁺⁺	14,1	17,7	-
	Mg ⁺⁺	1,1	0,7	-

	Na ⁺	0,1	0,1	0,3
	K ⁺	2,0	1,5	1,2
	H ⁺	1,2	1,6	-
Sodio de intercambio, % (PSI)		0,5	0,5	1,8
Suma de bases, meq/100 gr (S)		17,0	20,0	-
Capacidad de intercambio catiónico, meq/100 gr (T)		18,7	20,6	16,5
Saturación con bases, % (S/T)		92	97	-

6. Principales procesos de degradación ambiental

Los procesos de degradación reportados para la región son coherentes con los tipos de suelos, su estado evolutivo y las características propias del clima. La erosión eólica es el principal proceso presente, que, como se mencionó anteriormente fue un proceso geológico determinante en el desarrollo del paisaje regional. La aceleración de este proceso en determinados sitios, podría estar siendo consecuencia del uso de la tierra actual (Tripaldi *et al.*, 2010).

Cisneros *et al.* (2015) señalan que los principales procesos de degradación ambiental se asocian en su mayoría a fuertes cambios en el uso y el manejo de las tierras. Además de la erosión por viento, mencionan la degradación física, química y biológica de suelos bajo intenso uso agrícola, la degradación de la vegetación natural y la pérdida de la biodiversidad. En cuanto a la erosión eólica en esta región (Cholaky *et al.*, 2019) reportan su asociación a ciclos secos, suelos arenosos a franco arenosos en conjunto con prácticas de uso y manejo inadecuados; como, por ejemplo, rotaciones con insuficientes niveles de cobertura y aportes de rastrojo, así como también una escasa implementación de técnicas de mitigación.

Referencias bibliográficas

- Apodaca, M., J. Crosci, y L. Katinas. (2015). Las provincias fitogeográficas de la República Argentina: definición y sus principales áreas protegidas. En R. R. Casa y G. F. Albarracín (Eds.), *El deterioro del suelo y del ambiente en la República Argentina* (1 ed., Vol. 1, pp. 604). Buenos Aires, Argentina: Fundación para la Educación la Ciencia y la Cultura. FECIC.
- Cabido, D., M. R. Cabido, S. M. Garré, J. A. Gorgas, R. A. Miatello, A. C. Ravelo, . . . H. Acuña. (2003a). *Regiones naturales de la provincia de Córdoba*. Córdoba, Argentina. : Agencia Córdoba. Dirección de Ambiente.
- Cabido, D., M. R. Cabido, S. M. Garré, J. A. Gorgas, R. A. Miatello, A. C. Ravelo, . . . H. Acuña (Mapa). (2003b). *Regiones naturales de la provincia de Córdoba*. BID-PID 013/2009-2015. Bases ambientales para el ordenamiento territorial del espacio rural de la provincia de Córdoba. En <http://www.ordenamientoterritorialcba.com/web3/>
- Cantero, A., M. P. Cantu, J. M. Cisneros, J. J. Cantero, M. Blarasin, A. Degioanni, . . . J. De Prada. (1998). *Las tierras y aguas del Sur de Córdoba. Propuestas para un manejo sustentable*. Universidad Nacional de Rio Cuarto, Cordoba.
- Cantú, M. (1992). Provincia de Córdoba. En M. Iriondo (Ed.). *El Holoceno en la Argentina* (Vol. 1). Paraná: Editorial CADINQUA.
- Cantú, M., y S. Degioanni. (1984). *Geomorfología de la Región Centro Sur de la Provincia de Córdoba*. Trabajo presentado en el 9º Congreso Geológico Argentino, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. Actas IV: 76–92.
- Carignano, C., D. Kröhlning, S. Degioanni, y M. Cioccale. (2014). *Geomorfología*. Trabajo presentado en el XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Cholaky, C., J. M. Cineros, J. Gonzáles, S. Cabrera, J. Corigliano, y O. Plevich. (2019). Provincia de Córdoba. En R. Casas y F. Damino (Eds.), *Manual de buenas prácticas y conservación del suelo y del agua en áreas de secano* (1 ed., Vol. 1, pp. 557). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Fundación Ciencia, Educación y Cultura. FECIC.
- Cisneros, J., A. Degioanni, J. Gonzalez, C. Cholaky, A. Cantero, J. Cantero, y J. Tassile. (2015). *Erosión y degradación de suelos*. Provincia de Córdoba. En R. R. Casa y G.

- F. Albarracín (Eds.), *El deterioro del suelo y el ambiente en la Argentina* (1° ed., Vol. II, pp. 87-100). Buenos Aires: FECIC. Fundación para la Educación la Ciencia y la Cultura.
- Cisneros, J. M., C. O. Nuñez, J. J. Cantero, A. Degioanni, O. Plevich, M. Cabido, . . . A. Amuchastegui. (2002). Caldenia Cordobesa: Una síntesis florística y ambiental. En: Documento Resumen de la 1° Reunión Nacional para la Conservación de la Caldenia Argentina.. Agencia Córdoba D.A.C.yT. Ciudad de Córdoba. Argentina.
- De Ruyver, R. (2015). Argentina: Síntesis Climática. Caracterización ambiental de la República Argentina. En R. R. Casa y G. F. Albarracín (Eds.), *El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina* (1 ed., Vol. 1, pp. 604). Buenos Aires, Argentina: Fundación para la Educación la Ciencia y la Cultura. FECIC.
- Degiovanni, S., M. Villegas, M. Blarasín, y G. Sagripanti. (2005). Hoja Geológica 3263-III. Río Cuarto. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Buenos Aires. Boletín 349. 95 p.
- Escudero, A. N. (2005). Despuntando historia: Raíces de Del Campillo y zona.
- Gorgas, J. A., J. L. Tassile, E. M. Zamora, M. V. Bustos, M. Carnero, J. E. Pappalardo, y G. Petropulo. (2011). Mapa de Suelos de la Provincia de Córdoba. Nivel de Reconocimiento. Escala 1:500.000. Convenio INTA – Secretaria de Ambiente de Córdoba. BID-PID 013/2009-2015. Bases ambientales para el ordenamiento territorial del espacio rural de la provincia de Córdoba.
- Iriondo, M., y D. M. Kröhling. (1995). El sistema eólico pampeano. *Comunicaciones Museo Provincial de Ciencias Naturales " Florentino Ameghino"*, 5, 1-68.
- Jarsún, B., J. A. Gorgas, E. Zamora, H. A. Bosnero, E. Lovera, A. Ravelo, y J. Tassile. (2006). *Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba: Los Suelos. Nivel de Reconocimiento 1:500.000* Córdoba, Argentina: Agencia Córdoba Ambiente DACYT-SEM, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi.
- Marengo, J. A., B. Liebmann, A. M. Grimm, V. Misra, P. L. S. Dias, I. F. A. Cavalcanti, . . . C. S. Vera. (2012). Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, 32(1), 1-21. doi: 10.1002/joc.2254

- Masciángelo, P. (2014). Red hidrográfica de la provincia de Córdoba. BID-PID 013/2009-2015. Bases ambientales para el ordenamiento territorial del espacio rural de la provincia de Córdoba. En: <http://www.ordenamientoterritorialcba.com/web3/>
- Nicholson, S. E. (2011). *Dryland climatology*: Cambridge University Press.
- Oliva, E. (2014). El incremento de las lluvias, el cambio climático más importante en el centro de Argentina Retrieved 26/04/2019, 2019, En: <http://www.unciencia.unc.edu.ar/2014/septiembre/climatologia-1941-2010/el-incremento-de-las-lluvias-el-cambio-climatico-mas-importante-en-el-centro-de-argentina>.
- Pérez Zavala, G., M. Tamagnini, y E. Olmedo. (2017). La Frontera Sur y los Ranqueles: su historia y proyección. Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Nacional de Río Cuarto. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. 45 pp.
- Schneider, C. F. (2005). Análisis de los patrones de deforestación en el Corredor Biogeográfico del Caldén (Córdoba, Argentina) y su relación con la distancia a caminos, mediante un Sistema de Información Geográfica. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2007). Primer inventario Nacional de Bosques Nativos. Segunda Etapa. Dirección de Bosques. Subsecretaría de Planificación y Política Ambiental. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. República Argentina. 236 p. .
- Servicio Meteorológico Nacional. (2019). Estadísticas de largo plazo, from <https://www.smn.gob.ar/>
- Tripaldi, A., M. A. Zárate, S. L. Forman, y M. Doyle. (2010). *Early-mid XX century aeolian reactivation in the western Pampas*. Trabajo presentado en el 18° International Sedimentological Congress. Mendoza, Argentina.
- USDA. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (12 ed.). USA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales.
- Van Wambeke, A., y C. Scoppa. (1980). Las tasas climáticas de los suelos argentinos. Publicación N° 168.



Viglizzo, E. F., Z. E. Roberto, M. C. Filippin, y A. J. Pordomingo. (1995). Climate variability and agroecological change in the Central Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 55(1), 7-16.

WorldClim.org. (2010). Precipitacion media anual. Serie climática 1950-2000. En: BID-PID 013/2009-2015. Bases ambientales para el ordenamiento territorial del espacio rural de la provincia de Córdoba.



CAPÍTULO III

DETECCIÓN DE MÉDANOS Y FOCOS DE EROSIÓN COMO INDICADORES DE AMBIENTES SUSCEPTIBLES A LA REACTIVACIÓN DE PROCESOS DE EROSIÓN EÓLICA Y DESERTIFICACIÓN

1. Introducción

Las Naciones Unidas han definido *desertificación* como un “...proceso complejo que reduce la productividad y el valor de los recursos naturales en el contexto específico de condiciones climáticas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, como resultado de variaciones climáticas y de acciones humanas adversas” (UNCED, 1992; UNCCD, 1994). Este proceso ocurre cuando el hombre genera transformaciones en el territorio de tal magnitud que la capacidad regenerativa del ecosistema se ve superada (Valderrama, 2017). La República Argentina es el país de América Latina con mayor superficie bajo las condiciones climáticas anteriormente mencionadas (75 % del territorio nacional). Sin embargo, estos ambientes, producen el 50 % del valor de la producción agrícola nacional y el 47 % de la ganadera; concentrando, además, aproximadamente el 30% de la población nacional (9 millones de personas). Según datos del Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación [PAN], de los 276 millones de hectáreas que componen el territorio continental nacional, 60 millones están afectadas por distintos procesos y grados de desertificación y degradación de suelos, cuyos incrementos se estiman en 650.000 hectáreas por año (Pérez Pardo, 2005).

Los procesos que de alguna manera provocan en forma real o potencial una disminución de la capacidad productiva del suelo se denominan procesos de degradación, uno de los más importantes es la erosión, tanto hídrica como eólica (FAO-Unesco, 1975). La erosión eólica es uno de los principales desencadenantes de la desertificación. Según Casas (2015), en la República Argentina se registran 41 millones de hectáreas con erosión eólica, mientras que para la provincia de Córdoba Cisneros *et al.* (2015) reportaron 3,3 millones de hectáreas afectadas y un incremento del 74% en la superficie con un grado alto de afección respecto a lo registrado por Marelli (1996), principalmente hacia el SO de la misma (Cisneros *et al.*, 2015); geográficamente sobre la región de la Pampa Medanosa. Tripaldi *et al.* (2010) y Bécher Quinodoz (2014) han mencionado la reactivación de médanos en esta zona como consecuencia de la deforestación y de la intensificación de uso de la tierra en la región.

Por otro lado, si bien existen mapas actuales de susceptibilidad a la erosión eólica para la provincia de Córdoba (Cisneros *et al.*, 2015) y de su geomorfología (Carignano *et al.*, 2014), no existen antecedentes actuales de trabajos específicos en cartografía de médanos. Las áreas sensibles o más propensas a degradarse por erosión eólica son indicadores de desertificación y pueden ser empleados como herramientas de medición del estado de degradación de un territorio. Por lo tanto, el objetivo de este capítulo fue generar información de utilidad para el ordenamiento territorial de los ecosistemas frágiles de esta región mediante la realización de un inventario de áreas con procesos de degradación. Ello implica el reconocimiento, localización y dimensionamiento de tierras que han sufrido o están sufriendo procesos de desertificación mediante la identificación de focos de erosión y la localización de médanos, entendiéndose estos últimos como el resultado de procesos avanzados de erosión.

La selección tanto de las geoformas medanosas como de los focos de erosión como indicadores se ejerció en vista de que cumplen con una serie de pautas sugeridas por Abraham y Salomón (2006). Dentro de ellas, se destaca que son conocidos y significativos para diferentes tipos actores sociales, tienen relevancia política, son importantes para los funcionarios gubernamentales que tratan aspectos ambientales y atienden la relación costo-eficacia, ya que la selección de indicadores según estos autores implica un compromiso convenido entre la precisión de la información, el tiempo, el equipamiento requerido o disponible y la representatividad de los datos reunidos.

La cartografía de los indicadores seleccionados será de utilidad como información de base para la planificación del uso y del manejo de las tierras; en el marco de la Agenda 2030, podrá ser empleada para contribuir a la lucha contra la desertificación, la rehabilitación de tierras y suelos degradados (Naciones Unidas, 2015).

Los indicadores son herramientas que traducen sintéticamente información acerca del estado y la tendencia de los sucesos ambientales (Rubio y Bochet, 1998). Huaico Malhue *et al.* (2018) en su revisión sobre la evolución de enfoques de desertificación, encontraron que un 57 % de los trabajos revisados implementaron indicadores biofísicos para evaluar el avance de procesos ambientales degradativos. Estos indicadores integran elementos del paisaje, biológicos como las coberturas vegetales, con indicadores físicos como la

geomorfología. El indicador más usado dentro de la categoría físicos es la forma del relieve. Según estos autores, indicadores económicos como el tipo de uso de la tierra, cuya incorporación es posible mediante la utilización de imágenes de satélite, es significativo para evaluar el estado y la presión ejercida sobre el recurso suelo; y a su vez, se adapta al trabajo a escalas pequeñas que implican grandes áreas de trabajo. Y, en vista de que la desertificación es la materialización de la ruptura del equilibrio dentro de un sistema en el que interactúan los recursos naturales, la sociedad y las políticas económicas, es fundamental tener presente la participación de factores socioeconómicos para entender el inicio de los procesos de degradación y lograr su prevención. Principalmente en los ecosistemas áridos y semiáridos, vulnerables a la explotación excesiva, inapropiados usos de la tierra y al cambio climático, donde este enfoque preventivo es esencial para asegurar la productividad a largo plazo (Huaico Malhue *et al.*, 2018).

Dado lo anteriormente expuesto, se propusieron como indicadores de ambientes susceptibles a la reactivación de procesos de erosión eólica y de desertificación a las formaciones medanosas y a los focos de erosión. Ambos contemplan aspectos biofísicos y de múltiples maneras se relacionan directamente con el uso actual de la tierra, principalmente los focos de erosión, que lo hacen desde su génesis. Mientras que las geoformas medanosas, aunque durante la génesis de la mayoría de ellas y las más grandes no hubo participación antrópica (Instituto de Suelos y Agrotecnia, 1948), son un claro indicador de fragilidad ecológica y permiten la exposición de la incompatibilidad entre el uso puramente agrícola y estos ambientes, denotando a simple vista la necesidad de un reordenamiento del territorio.

Por otra parte, los elementos seleccionados como indicadores han sido utilizados a nivel nacional (Abraham y Salomón, 2006) y están ampliamente difundidos tanto entre los productores de la zona como entre los actores políticos locales y provinciales. Quienes conocen e identifican a las dunas con el nombre de *médanos* y a los focos de erosión con el nombre de *voladuras*, en las que incluyen los pequeños cúmulos de arenas, denominados frecuentemente acumulaciones de *guadal*. Se destaca que la información generada está en un lenguaje perfectamente comprensible para los tomadores de decisiones del medio rural en estudio siendo de gran utilidad no solo para los productores, sino también como información de base para la construcción de proyectos de conservación y de prevención de la degradación



de los suelos en el marco de la Ley provincial para la Conservación y la Prevención de Degradación de los Suelos (Ley provincial N° 8936, 2001).

Los objetivos del capítulo fueron dos, por un lado, a través de la digitalización de las geoformas medanosas dar información de base para la generación de áreas de protección/conservación. Y, por otro lado, a través de la digitalización de los focos de erosión; dimensionar y ubicar espacialmente la reactivación de procesos eólicos y de desertificación en el área medanosa de la provincia de Córdoba.

2. Materiales y métodos

Para la generación de los mapas digitales se establecieron dos elementos a cartografiar. Por un lado, *médanos*: geoformas representadas por material erosionado bien definidas, y, por otro lado, *focos de erosión eólica*: aquellos sitios donde los procesos de degradación erosivos están comenzando o reactivándose. Estos últimos, son estadios intermedios que comprenden campos volados, desaparición del tapiz vegetal, alteraciones de la superficie por acumulaciones incipientes de arenas, playas voladas. Situaciones nominadas *voladeras* en el informe técnico “La erosión eólica en la Región Pampeana y Plan para la Conservación de los suelos” del Instituto de Suelos y Agrotecnia (1948).

La identificación y digitalización de ambas situaciones se realizó mediante el análisis visual de imágenes satelitales empleando los criterios de la fotointerpretación clásica: tono, color, textura, estructura, tamaño, localización y contexto (Chuvienco Salinero, 2008). Las imágenes fueron provistas por las plataformas de Google Maps (Google Maps, 2018) y Bing Maps (Microsoft, 2018), a través de los complementos Open Layers Plugin y Quick Map Services del Software Q Gis v2.14.3 Essen y Q Gis v3. 4.6 Madeira (QGIS Development Team, 2019).

La escala de trabajo, condiciona la unidad mínima cartografiable (Chuvienco Salinero, 2008) y, dada la variabilidad en cuanto a la resolución espacial de las imágenes satelitales provistas por las plataformas de Google Maps y Bing Maps, se seleccionó una escala de 1:25.000 que permitiera trabajar con la generalidad de las imágenes disponibles. El área total cartografiada comprendió aproximadamente 1.400.000 hectáreas, la totalidad de la región de la Pampa Medanosa.

Para la identificación mediante la interpretación visual y posterior digitalización manual tanto de las geoformas medanosas como de los focos de erosión se tuvieron en cuenta tres *sub sets* de indicadores visuales:

En primer lugar, del tipo físicos, como material suelto desplazado, acumulado o removilizado por el viento, el que generalmente se compone de arenas y que consta de un albedo mayor que las áreas con otras coberturas. La mayor reflectancia observada en estas

superficies caracteriza su tono claro, que hace referencia a la cantidad de energía recibida por el sensor para una banda particular del espectro. El tono es uno de los principales criterios de interpretación visual (Chuvieco Salinero, 2008). Por otra parte, la forma del relieve, la altitud y la formación de cubetas de deflación fueron también indicadores físicos que colaboraron en la identificación de geformas medanosas. Las cubetas suelen presentar agua que se aprecia en tonos oscuros y sales que se perciben en tonos claros de colores blancos, a diferencia de las arenas que se aprecian en un tono levemente menor y con un color más amarillento. El color es otro de los elementos básicos de la interpretación visual de imágenes (Chuvieco Salinero, 2008). Además, las áreas con removilización de material por viento constan de una textura muy característica y el desplazamiento de las acumulaciones de material removilizado respeta la dirección y el sentido de los vientos predominantes.

En segundo lugar, se incluyeron indicadores del tipo biológicos, representados por la presencia o ausencia y el tipo de coberturas vegetales. Una cobertura vegetal vigorosa como cultivos y pasturas estivales ofrecen tonos oscuros en las bandas visibles del espectro electromagnético, particularmente en el azul y el rojo (Chuvieco Salinero, 2008), que contrastan con los tonos claros de los materiales erodados y de los pastizales que crecen asociados a las dunas y presentan una textura más gruesa.

Y, en tercer lugar, se incluyó un indicador económico, representado por el uso de la tierra. El patrón del uso agrícola se interrumpe repentinamente ante la aparición de dunas y paleodunas, rodeándolas y acusando sus límites. Estas tienen una forma bien definida, aparecen activas, fijadas o parcialmente fijadas, con vegetación natural o implantada de permite visualizar sus límites. Por lo tanto, fueron delimitadas percibiendo cambios en la vegetación, en el material superficial, en la coloración y el albedo de la superficie, en los manejos y usos asignados a la unidad.

Como herramienta complementaria se utilizó Google Earth Pro (2018) que permitió extraer perfiles de elevación para contemplar la variable altitud.

3. Resultados y discusión

Se logró la confección, por un lado, de un mapa de *geoformas medianosas* y, por otro, de un mapa de *focos de erosión eólica* ambos para la región de la *Pampa Medanosa Cordobesa* en escala 1:25.000. Ambos disponibles para su empleo en formato shape⁸.

3.1. *Geoformas medianosas*

La superficie total correspondiente a geoformas medianosas identificadas en la *Pampa Medanosa Cordobesa* fue de 73.671,6 hectáreas, tanto activas como fijadas por vegetación, las que representan aproximadamente el 5 % superficie total de la región. Se visualizan dos zonas de concentración de los médanos bien definidas y con características diferentes; una al norte del Río Popopis y otra al sur y oeste del mismo (Figura 7), en concordancia con lo expuesto por Carignano *et al.* (2014).

En lo que respecta a la dirección de formación de los médanos, se identificaron dos tendencias contrastantes, claramente visibles, separadas por una zona de transición. Hacia el norte del río Popopis (Quinto), las geoformas siguen direcciones de deposición NNE-SSO (Figura 8); mientras que las geoformas del SO de la región son de mayor tamaño, fraccionadas, disipadas y menos perceptibles, y expresan una dirección de formación SSE-NNO. Empero, observándose una superposición de formaciones más recientes, de dirección NNE-SSO, sobre las anteriores. Este fenómeno de superposición de geoformas ocurre desde la localidad de Villa Valeria (30°20'29.35" Latitud Sur) hacia el sur, evidenciando no solo la ocurrencia de más de un ciclo de deposición de sedimentos eólicos, sino también que los vientos durante estos ciclos tuvieron direcciones predominantes diferentes. Estas observaciones coinciden con las de Carignano *et al.* (2014) quienes mencionan para la provincia de Córdoba un escenario con ciclos secos y vientos fuertes provenientes del sur durante finales del Pleistoceno y comienzos del Holoceno (entre ca. 30 ka y ca. 9 ka.) en el que se depositó el manto de loess (planicie fluvioeólica central) y se formaron los mantos y campos de dunas (planicie eólica arenosa del sur) que condicionan la

⁸ Mapas en formato shape:

<https://drive.google.com/drive/folders/1u7HVdJuR1-a5rD-U6eRGfWroV010Ikjd?usp=sharing>



actual morfología de las llanuras. Y otro escenario más tardío, perteneciente al Holoceno (entre ca. 3 ka y ca. 1 ka.) que replica el escenario anterior, empero con un cambio en la dirección predominante de los vientos, esta vez provenientes del NE y en el que se erosionan geoformas y remobilizan materiales hasta alcanzar el *Optimum Climaticum*.

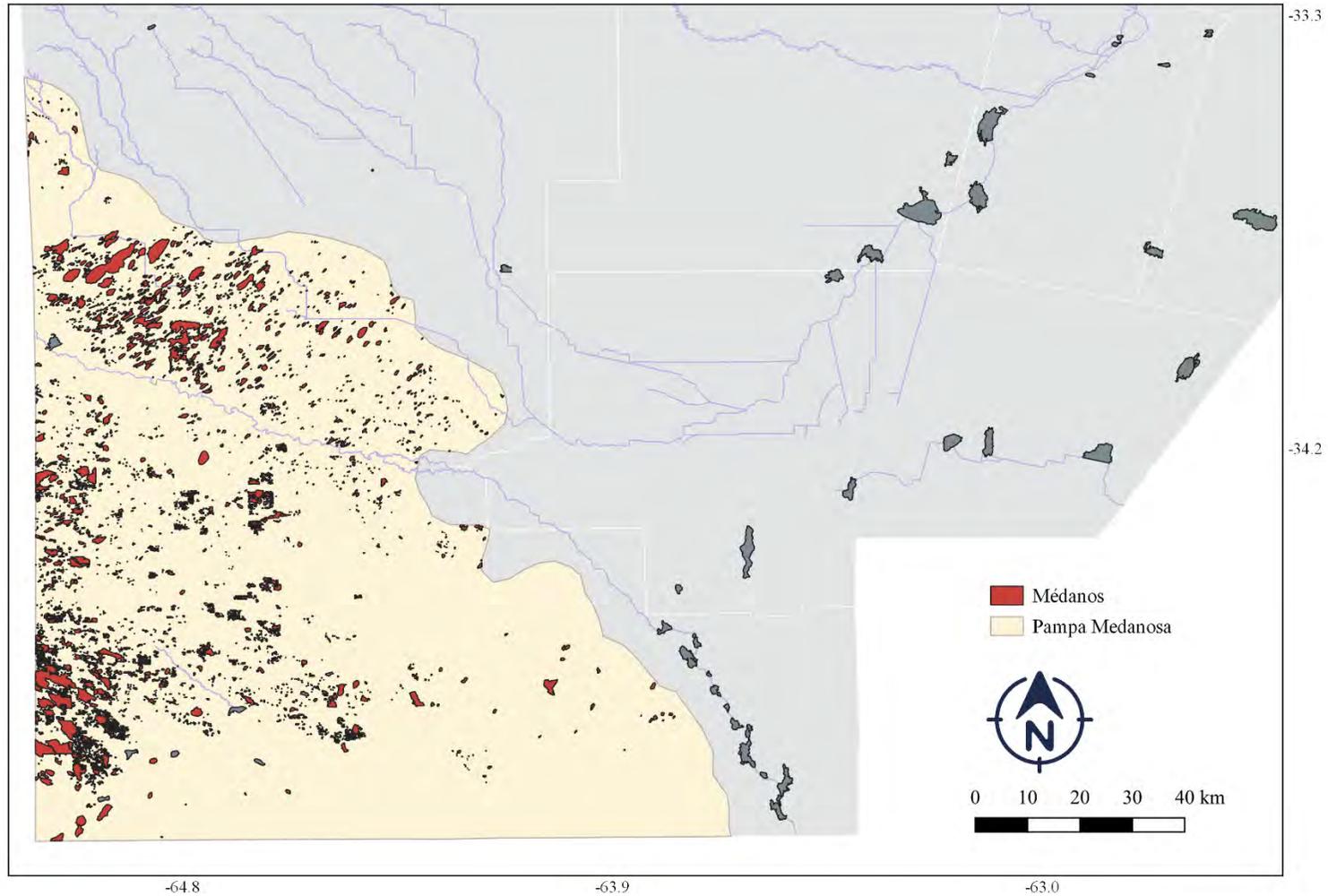


Figura 7. Digitalización de Geformas medanosas de la Pampa Medanosa Cordobesa. La superficie total ocupada por las geformas es de 73.671,6 hectáreas. Se visualizan dos zonas de concentración de médanos diferenciadas por su dirección de formación: una hacia norte del Río Popopis de tipo parabólicas y dirección NNE-SSO; y otra al sur y oeste de la región, fraccionadas y de mayor tamaño, con dirección SSE-NNO.

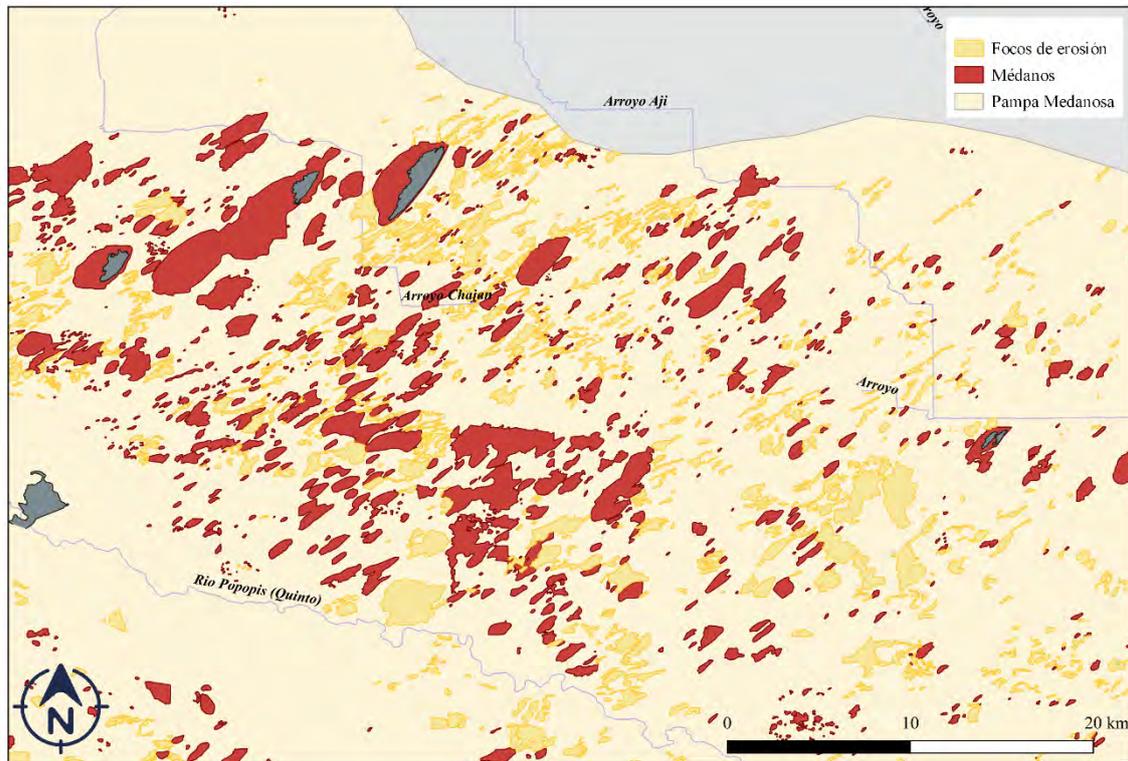


Figura 8. Formaciones medanosas sobre el norte del río Popopis (Quinto). Estas son las más jóvenes de la región, de tipo parabólicas con sus cubetas de deflación en el sector NNE indicando el sentido predominante de los vientos durante su formación.

Los médanos ubicados hacia el norte del río Quinto, pertenecen a formación Laguna Oscura definida por Cantú (1992) y se encuentran dentro del Campo de Dunas de Laguna Oscura definido por Carignano *et al.* (2014). Son las más recientes en cuanto a su formación. Desarrollados durante la “pequeña edad de hielo” (PEH), período de enfriamiento y sequía que coincidió aproximadamente con el período colonial americano, y que en la Argentina produjo avances de glaciares en la Cordillera de los Andes y aridez en las tierras bajas (Cantú y Degiovanni, 1984). Iriondo (2010) menciona una removilización de arena eólica durante la PEH en un área de unos 1.500 km² en la que se hallan las localidades de General Paunero y Washington.

Este sector, exhibe dunas parabólicas de diferentes tamaños que deben su origen a vientos de dirección NNE-SSO, presentan formas definidas, en gran medida asociadas a cubetas de deflación en el sector ENE, áreas cóncavas con lagunas permanentes y semipermanentes que durante los ciclos húmedos se llenan de agua (Blarasin y Sánchez, 1987) (Figura 9). Las dunas que lo componen son de distintas edades, algunas de ellas de

origen antrópico y otras, la mayoría de ellas y las más grandes son más antiguas a la instalación de los primeros colonos (Instituto de Suelos y Agrotecnia, 1948; Cantú, 1992).

En este sector, se destaca la presencia de médanos parcial o totalmente fijados con vegetación espontánea e implantados con árboles o cañaverales. El Instituto de Suelos y Agrotecnia (1948) menciona la fijación de estos médanos durante los años próximos a la gran sequía de 1937 con Caña de Castilla (*Arundo donax L.*) y hace referencia a dificultades encontradas durante la construcción de los caminos y rutas por las acumulaciones de arenas y la formación de médanos (Figura 10).

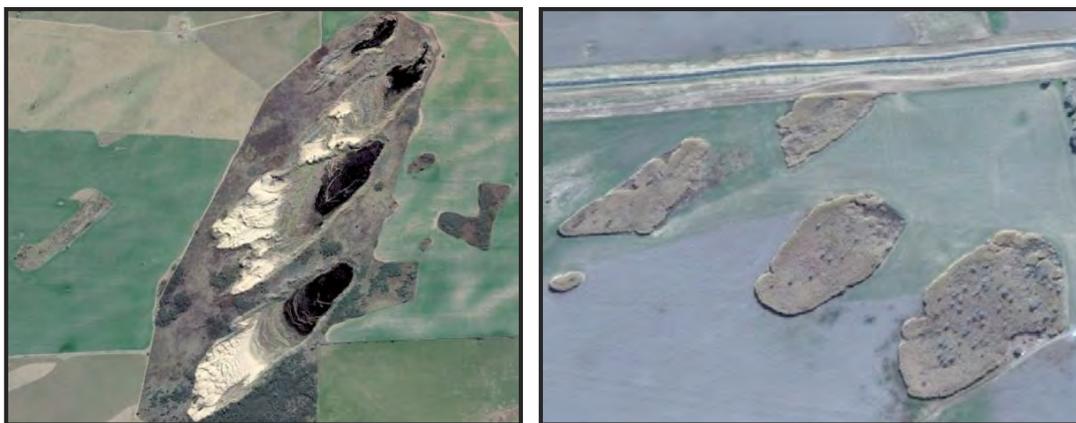


Figura 9 (izquierda). Dunas parabólicas activas, de dirección NNE-SSO al norte de la Laguna Oscura (Google Earth Pro, Digital Globe, 2018). **Figura 10 (derecha).** Vista de imágenes satelitales de médanos fijados con cañaverales al sur de General Paunero, sobre la Ruta Nacional N°7 (Google Earth Pro, Digital Globe, 2018).



Figura 11 (Izquierda). Médanos fijados con pastizales y álamos sobre la Ruta Nacional N° 7, su cubeta de deflación presenta una laguna semipermanente. **Figura 12 (Derecha).** Relicto de monte nativo, “chañaral”, al norte de la localidad de Villa Huidobro.

Hacia el sur del río Quinto la dirección de formación predominante es SSE-NNO, lo que indica que se formaron en un tiempo geológico anterior, en el que los vientos tuvieron una dirección diferente. Zárate y Tripaldi (2012) describen en el sur de San Luis dunas longitudinales (de hasta 25 km de longitud), y sugieren un origen por vientos provenientes del sudeste. Ramonell *et al.* (1992) deducen una edad pleistocena tardía para las dunas longitudinales y Holoceno tardío para algunos de los campos de dunas sobre impuestos de San Luis. En el campo de dunas de Villa Valeria se observa claramente la sobreimposición a la que refiere Ramonell (*op. cit.*) (Figura 18).

Tripaldi y Forman (2007) y Latrubesse y Ramonell (2010) obtuvieron edades de estos campos de dunas en el sudeste de San Luis, por medio dataciones utilizando el método OLS (Optically Stimulated Luminescence dating), los primeros autores determinaron que corresponden al Último Máximo Glacial, mientras que para la secuencia de Laguna Oscura alcanzaron edades inferiores.

En pos de lo expuesto, los médanos no tienen una componente antrópica en su formación. Por lo que serían particularmente indicadores de ecosistemas frágiles y susceptibles a erosión eólica. Aunque la reactivación de la movilización de materiales en médanos agriculturizados sí corresponde a procesos de degradación desencadenados por el ser humano y se constituiría un indicador de desertificación (Figuras 13 y 14).

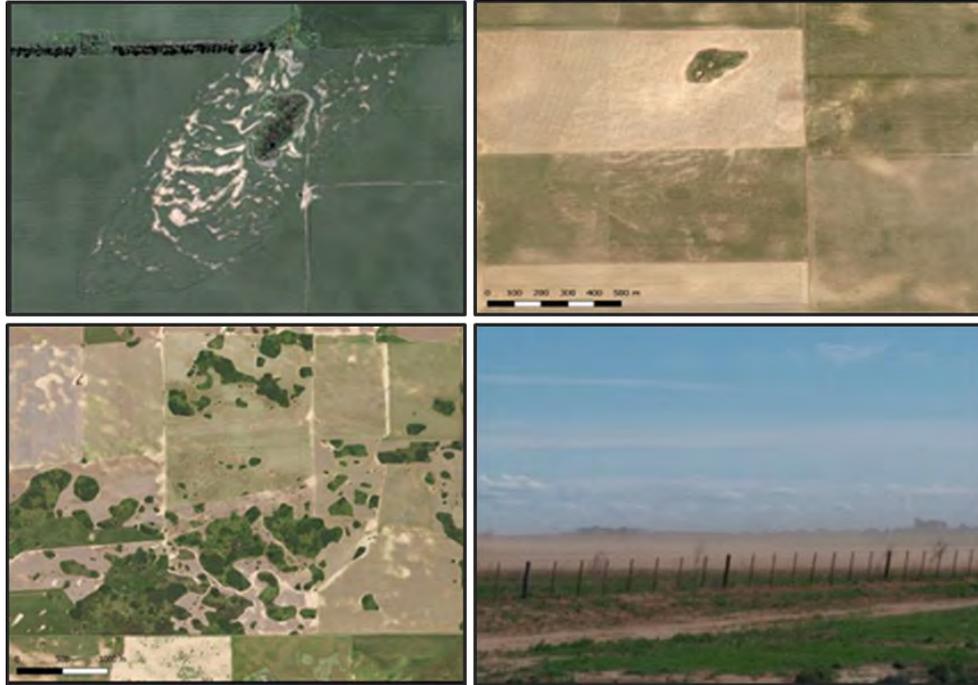


Figura 13. Médano bajo uso agrícola, con reactivación de procesos erosivos (Google Earth Pro, Digital Globe, 2018). **Figura 14.** Médano bajo uso agrícola al norte de la localidad de Nicolás Bruzzone, con reactivación de procesos erosivos (Bing Maps, 2019). **Figura 15.** Fraccionamiento de las geoformas medanosas por el uso agrícola y deforestación. **Figura 16** (Derecha abajo). Campo volando en cercanías de la localidad de Ranqueles, sobre la ruta provincial N° 26.

En el sector sur de la región, el fraccionamiento por el uso agrícola de las geoformas medanosas y la deforestación es evidente (Figura 15). Aquellas que no han sido agriculturizadas, se conservan fijadas por monte nativo y pastizales naturales. La presencia de zonas de activa deflación es mucho menor que hacia el norte, exhibiendo mayor estabilidad (Figura 17 a Figura 20).

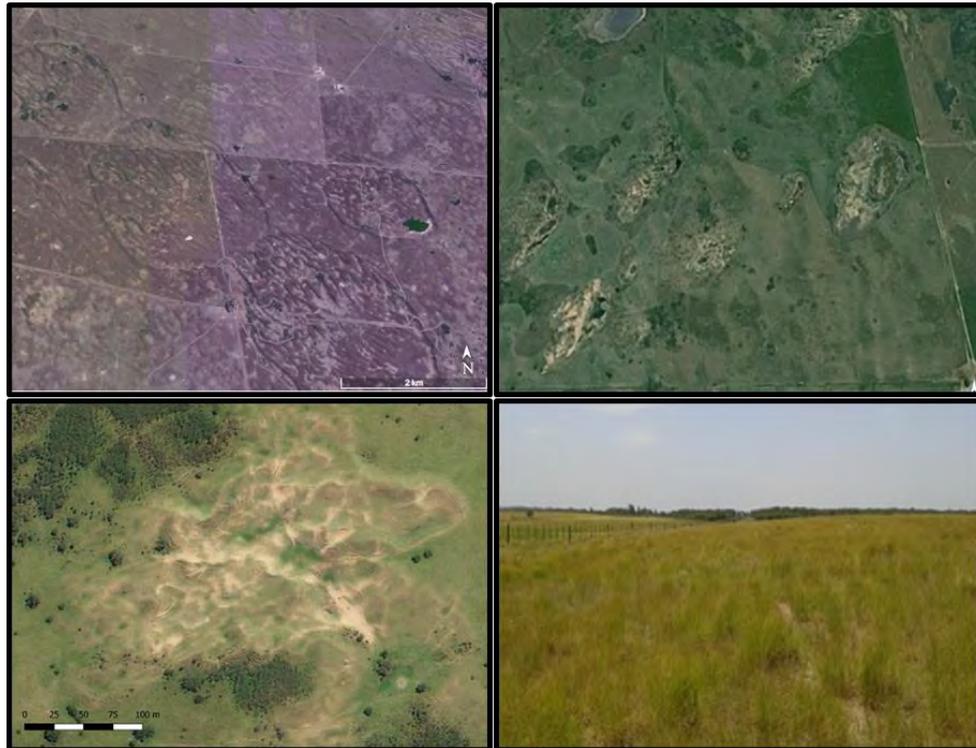


Figura 17 (Superior izquierda). Cadenas de dunas en cadena fijadas de dirección SSE-NNO al oeste de Buena Esperanza, San Luis (Google Earth Pro, Digital Globe, 2018). **Figura 18 (Superior derecha).** Dunas disipadas de dirección SSE-NNO al oeste de Villa Huidobro, a las que se le sobre imponen dunas más recientes de dirección NNE-SSO (Google Earth Pro, Digital Globe, 2018). **Figura 19 (Inferior izquierda).** Dunas disipadas y parcialmente fijadas por pastizales y monte nativo al norte de Villa Huidobro. **Figura 20 (Inferior derecha).** Cresta de duna fijada pastizales en un establecimiento al norte de Villa Huidobro.

3.2. *Focos de erosión*

En lo que respecta al segundo indicador seleccionado, la visualización de nuevos *focos de erosión* (Figura 21), representados por superficies desprovistas de cobertura, con material filtrado por el viento y expuesto en lotes agrícolas que no expresan un cambio de uso de la tierra atendiendo la ocurrencia de estos procesos, sustenta lo destacado por Casas (2001), quien menciona que la erosión eólica se ha ido reduciendo de manera visible en la mayor parte de la región Pampeana, excepto en el sur de Córdoba, este de San Luis y sur de la provincia de Buenos Aires (partidos de Villarino y Patagones).



Figura 21. a) Vistas satelitales de focos de erosión eólica en campos agrícolas (Imágenes de Bing TM Maps platform, Bing Satellite, 2018).



Figura 21. b) Vistas a campo de focos de erosión eólica en campos agrícolas (Fotografías tomadas en el año 2017 en establecimientos ubicados sobre la Ruta Nacional N°7).

La agriculturización de los médanos es un proceso frecuente en la región y de gran importancia ya que, según su manejo, puede dar lugar a nuevos focos de erosión, tal como lo muestra la Figura 22.



Figura 22. Campo agrícola sembrado con cultivo de maní, en el que se observan enormes deposiciones recientes de arenas cubriendo el alambrado en dirección NE-SO. La fotografía se tomó en la campaña 2017/18, en un establecimiento ubicado sobre la Ruta Nacional N° 7.

Se digitalizaron en total 66.448 hectáreas de focos de erosión eólica (Figura 23). Lo que representa un 4,75% del total de la superficie de la región. Se los observó en tierras bajo uso antrópico, en su mayoría tierras agrícolas, aunque también estuvieron presentes en tierras ganaderas hacia el sur del río Quinto. En vista de que se los encontró asociados a una variable antrópica como el uso de la tierra, cumplen con el rol de un indicador de procesos de desertificación. Se encontraron focos en diferentes grados de evolución, desde materiales claros dispersos en superficie, hasta montículos de gran tamaño adquiriendo formas de médanos incipientes (Figura 22).

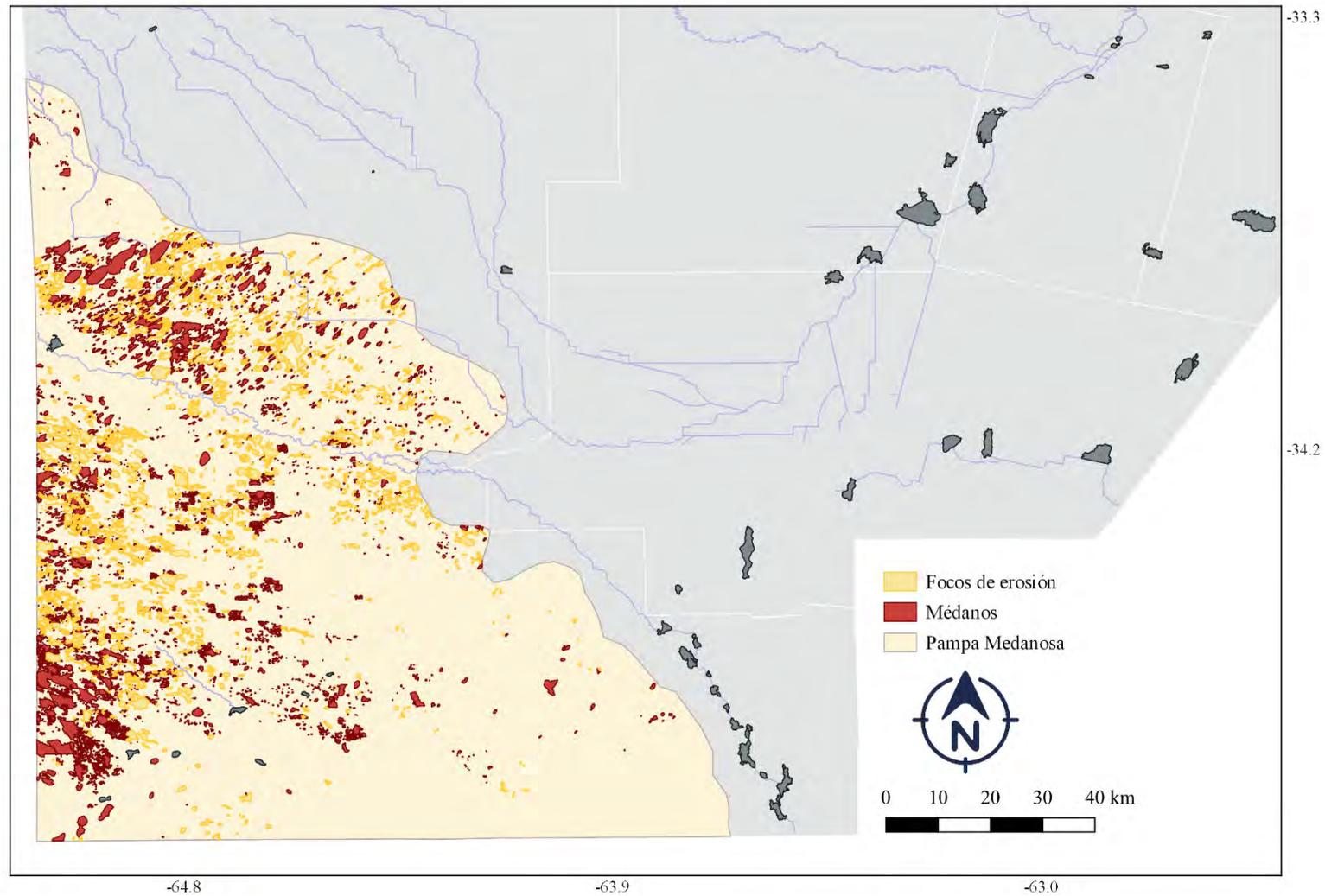


Figura 23. Nuevos focos de erosión eólica activos en la Pampa Medanosa Cordobesa. Localizados principalmente sobre el norte y oeste de la región en los sectores donde se concentran los médanos, y desarrollados en áreas que actualmente pertenecen a sistemas de producción con agricultura.

4. Conclusiones

La superficie total cartografiada correspondiente a geoformas medanosas en la Pampa Medanosa Cordobesa permitió identificar sectores de dunas de génesis holocena y de megadunas más antiguas. En total suman 73.671,6 hectáreas que indican que un 5 % de la superficie total de la región son ambientes que requieren controles, regulaciones y restricciones para la protección/conservación, atendiendo su fraccionamiento por el uso agrícola y la evidente deforestación en el corredor biogeográfico del Caldenal. Se digitalizaron además 66.448 hectáreas de focos de erosión eólica, confirmando que un 4,75% del total de la superficie de la región presenta reactivación de procesos erosivos de tipo eólicos. Hecho que señala la necesidad de la planificación del uso y manejo de la tierra con una visión a largo plazo, a los fines de rehabilitar las tierras degradadas y evitar el avance hacia la desertificación.

Referencias bibliográficas

- Abraham, E., y M. Salomón. (2006). Indicadores y puntos de referencia de la desertificación utilizados en argentina por diversos usuarios. *Indicadores de la Desertificación para América del Sur. IICA BID*, 113-140.
- Blarasin, M. T., y M. L. Sánchez. (1987). *Secuencia evolutiva de dunas cuaternarias en el sector de la Laguna Oscura. Departamento Río Cuarto, Provincia de Córdoba, República Argentina*. Trabajo presentado en el X Congreso Geológico Argentino Actas III: 297-300.
- Cantú, M. (1992). Provincia de Córdoba. En M. Iriondo (Ed.), *El Holoceno en la Argentina* (Vol. 1). Paraná: Editorial Cadinqua.
- Cantú, M., y S. Degiovanni. (1984). *Geomorfología de la Región Centro Sur de la Provincia de Córdoba*. Trabajo presentado en el 9º Congreso Geológico Argentino, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. Actas IV: 76–92.
- Carignano, C., D. Kröhling, S. Degiovanni, y M. Cioccale. (2014). *Geomorfología*. Trabajo presentado en el XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Casas, R. (2001). La conservación de los suelos y la sustentabilidad de los sistemas agrícolas. *Disertación en el acto de entrega del premio Antonio Prego*
- Casas, R. (2015). La erosión del suelo en Argentina. En R. R. Casas y G. F. Albarracín (Eds.), *El deterioro del suelo y del ambiente en la argentina*. (1 ed., Vol. II, pp. 433-452). Ciudad autónoma de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina: Fundación Ciencia, Educación y Cultura. FECIC.
- Chuvieco Salinero, E. (2008). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio (No. 528.8 CHU).
- Cisneros, J., A. Degioanni, J. Gonzalez, C. Cholaky, A. Cantero, J. Cantero, y J. Tassile. (2015). Erosión y degradación de suelos. Provincia de Córdoba. En R. R. Casa y G. F. Albarracín (Eds.), *El deterioro del suelo y el ambiente en la Argentina* (1º ed., Vol. II, pp. 87-100). Buenos Aires: FECIC. Fundación para la Educación la Ciencia y la Cultura.

- FAO-Unesco. (1975). Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. FAO, Roma.
- Google Earth Pro. (2018). Digital Globe. <https://earth.google.com/web/>
- Google Maps. (2018). Google Satellite.
- Huaico Malhue, A., M. A. Díaz Romero, y M. I. Carbajal Espejel. (2018). Evolución de los enfoques en desertificación: una revisión de 170 estudios de casos. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 57(2), 53-71.
- Instituto de Suelos y Agroecología. (1948). *La erosión eólica en la región Pampeana y plan para la conservación de los suelos*. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Agricultura de la Nación.
- Iriondo, M. H. (2010). *Geología del Cuaternario de Argentina*. Argentina: Editorial Moglia.
- Latrubesse, E. M., y C. G. Ramonell. (2010). *Landforms and chronology in the Pampean sand sea, Argentina*. Trabajo presentado en Abstracts Volumen, 18 International Sedimentological Congress, Mendoza, Argentina.
- Ley 10467. (2017). *Plan Provincial Agroforstal*. Córdoba, Argentina: En https://ppa.cba.gov.ar/Views/WebForms/Docs/PPA_LEY_10467.pdf.
- Ley provincial N° 8936. (2001). Ley de la conservación y la prevención de degradación de los suelos: Publicada en el Boletín oficial núm.136. 23 de julio de 2001. Secretaría de Agricultura y Ganadería de la provincia de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Marelli, H. J. (1996). Provincia de Córdoba. *El deterioro del ambiente en la Argentina*. (pp. 519): PROSA-FECIC.
- Microsoft. (2018). BingTM Maps Platform. Bing Satellite.
- Naciones Unidas. (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York. 2015. En <http://bit.ly/TransformAgendaSDG-pdf>.
- Pérez Pardo, O. (2005). *La desertificación en la República Argentina. La situación ambiental argentina*. Dirección de Conservación del Suelo y Lucha contra la Desertificación, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Ministerio de Salud y Ambiente de la Nación. Buenos Aires, Argentina.
- QGIS Development Team. (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. En <https://qgis.org>.



- Rubio, J. L., y E. Bochet. (1998). Desertification indicators as diagnosis criteria for desertification risk assessment in Europe. *Journal of Arid Environments*, 39(2), 113-120.
- Tripaldi, A., y S. L. Forman. (2007). Geomorphology and chronology of Late Quaternary dune fields of western Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 251(2), 300-320.
- UNCCD. (1994). United Nations Convention to combat desertification in those countries experiencing serious drought and / or desertification, particularly in Africa. United Nations Environment. Geneva: Interim Secretariat for the Convention to combat desertification.
- UNCED. (1992). Report of the United Nations Conference on Environment and Development at Rio de Janeiro, Managing Fragile Ecosystems. Combat Desertification and Drought. Chapter 12. U.N. New York.
- Valderrama, J. M. (2017). *Los desiertos y la desertificación. Los libros de la catarata. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*. 125p. Madrid, España.
- Zárate, M. A., y A. Tripaldi. (2012). The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Research*, 3(4), 401-417.



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS MULTI-TEMPORAL DE LA DINÁMICA ESPACIAL DEL USO DE LOS SUELOS EN LA PAMPA MEDANOSA

1. Introducción

En la Región Pampeana Argentina, la agricultura ha avanzado sobre áreas marginales, reemplazando pastizales, desplazado a los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos y fraccionando la vegetación nativa (Tittonel, 2004; Viglizzo *et al.*, 2010; Viglizzo *et al.*, 2011). Durante el período 1990-2006, la superficie total nacional cultivada aumentó aproximadamente un 45%, llegando el cultivo de soja a representar alrededor del 50% de la superficie cultivada en el año 2006. Al mismo tiempo, la diversidad de los agroecosistemas se vio disminuida en más de un 20% (Aizen *et al.*, 2009). Según Viglizzo *et al.* (2010), este fenómeno de expansión de la agricultura conjuntamente con la confinación de la ganadería en sistemas de alimentación a corral *-feed lots-* reemplazaron el modelo de rotaciones establecido entre cultivos anuales y pasturas o forrajeras anuales, mayormente conocido como “*mixto*”, que había sido consolidado por la co-evolución de la ganadería y la agricultura ocurrida durante la primera mitad del siglo XX.

El sur de la provincia de Córdoba no ha permanecido exento a los cambios de uso del suelo acaecidos a nivel nacional, difundándose en él la adopción de modalidades de arrendamiento de corto plazo que dificultan la planificación y amenazan la sustentabilidad de los agroecosistemas (de Prada *et al.*, 2008; Degioanni *et al.*, 2013). Particularmente, en la Pampa Medanosa, el cambio de uso del suelo podría no solo estar modificando la diversidad en cuanto a las especies cultivadas, sino que, además, podría estar induciendo efectos sobre la biodiversidad de comunidades nativas. Dentro de la región estudio, se halla incluido el *Corredor Biogeográfico del Caldenal* definido por el Decreto 891/2003 del gobierno de la provincia de Córdoba en el marco del Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011-2020 con la finalidad de aumentar la protección de especies amenazadas por la expansión de la frontera agropecuaria. El Caldén (*Prosopis caldenia* Burkart), árbol que otorga su nombre al corredor, es una especie endémica; diezmada luego de 1879 por el valor de su madera para la construcción de vías de ferrocarril y para el abastecimiento de locomotoras a vapor (Garbarino, 2008; Dussart *et al.*, 2011).

El análisis de los cambios en las coberturas de los suelos a través de la teledetección es una herramienta de utilidad para monitorear ecosistemas frágiles ya que el uso del suelo define su cobertura (Rawat y Kumar, 2015). Existen antecedentes a nivel nacional de estudios

empleando herramientas de teledetección para efectuar el seguimiento de las coberturas del suelo y así evaluar el cambio de su uso. Marini *et al.* (2007) y Marini (2008) condujeron un estudio multi-temporal utilizando árboles de clasificación en el que emplearon el índice de vegetación de diferencia normalizada [NDVI, por sus siglas en inglés] para estudiar el desplazamiento de la ganadería por la agricultura en un ambiente semiárido de la provincia de Buenos Aires. Por otro lado, Baumann *et al.* (2018) evaluaron el desempeño de un algoritmo basado en árboles de clasificación para la separación de coberturas boscosas en el Chaco Semiárido. Particularmente, para la región de estudio, no han sido empleadas metodologías de clasificación no paramétricas, pero Fiant *et al.* (2015) han realizado análisis multi-temporales de coberturas agrícolas como maíz, soja y maní, mediante uno de los más conocidos algoritmos de clasificación MLC [Clasificación de Máxima Verosimilitud].

Para mejorar la precisión en las clasificaciones la información espectral puede ser combinada con variables topográficas (Gislason *et al.*, 2006), teniendo presente que las técnicas estadísticas paramétricas no son apropiadas para este tipo de datos (Richards y Richards, 1999). Los árboles de clasificación son una herramienta no paramétrica que ha sido empleada para subsanar esta dificultad, cuyos problemas de sensibilidad al ruido y al sobreentrenamiento han sido mejorados por el empleo de los árboles no en modo aislado, sino en forma conjunta (Watts y Lawrence, 2008), conociéndose como “bosques aleatorios” y tomado el nombre en inglés de “Random Forests”. Breiman (2001) presentó un algoritmo basado en bosques aleatorios, al que denominó *Random Forest* (RF, por sus siglas en inglés). Este algoritmo logra la predicción de clases a través la votación mayoritaria de grupos de árboles de decisión. Los clasificadores son agrupados por *bagging*⁹ y entrenados por muestras seleccionadas mediante *bootstrapping*¹⁰. De cada grupo de muestras utilizado en el entrenamiento, uno siempre es dejada fuera del análisis (“*Out of Bag*”) para efectuar la validación. Mediante este, se obtiene el error “Out Of Bag” -OOB-, que aproxima sobre la precisión con la que la clasificación fue ejecutada por el algoritmo (Breiman, 2001; Gislason *et al.*, 2006; Lowe y Kulkarni, 2015; Janitzka y Hornung, 2018). Waske y Braun (2009) y

⁹ “*Bagging*” o “*Bootstrap aggregation*” es una técnica de aprendizaje automático –conocida también como empaquetamiento- que permite el entrenamiento de numerosos clasificadores por “subsets de datos” generados aleatoriamente a partir de un set de datos mayor; los resultados provistos por todos los predictores en conjunto permiten la obtención de la clasificación final (Breiman, 1996).

¹⁰ “*Bootstrapping*” método de muestreo propuesto por Efron (1992).

Ozdarici *et al.* (2012) han demostrado que RF alcanza mayor presión que MLC, siendo comparable con otras técnicas de aprendizaje automático como SVM [Máquinas de Soporte Vectorial]; destacándose que el usuario solo requiere definir dos parámetros (Liaw y Wiener, 2002; Pal, 2005).

El objetivo principal de este capítulo fue reconstruir la evolución temporal y espacial del uso del suelo en la Pampa Medanosa Cordobesa, desde 2006/07 hasta la actualidad. Para ello, se utilizó el algoritmo Random Forest (Liaw y Wiener, 2002) para el software R (R Core Team, 2019) basado en Breiman (2001) como alternativa a los sistemas de información geográfica [SIGs]. El empleo de R, a diferencia de la mayoría de los SIGs, presenta la ventaja de dar a conocer exactamente cuál es el algoritmo utilizado para realizar el análisis espacial (Goslee, 2011). Además, la elección del algoritmo RF presenta dos puntos positivos que posibilitan la mejora en la precisión de la clasificación, por un lado, facilita definir sus parámetros en función de indicadores de precisión y, por otra parte, y más importante aún, permite la utilización conjunta de información espectral y topográfica (Gislason *et al.*, 2006). Los modelos de aprendizaje automático en conjunto con R y las imágenes de los satélites Landsat son excelentes herramientas para emplear tanto en etapas iniciales diagnósticas como de control de la aplicación de políticas de ordenamiento territorial con un mínimo costo.

La evaluación de los cambios de uso del suelo a través del seguimiento de las coberturas vegetales mediante técnicas de clasificación no paramétricas permitió, en primer lugar, monitorear el avance de la agricultura sobre actividades ganaderas, pastizales y montes. Y, en segundo lugar, posibilitó identificar los principales cultivos agrícolas de la región y visualizar el movimiento del cultivo de maní dentro de la misma desde la campaña 2006/07 hasta la campaña 2018/19, en la Pampa Medanosa. Se logró, además, situar espacialmente montes de especies arbóreas nativas y no nativas – sin diferenciar entre ellas-.

Respecto de la exploración en la identificación de procesos erosivos, se destaca que fue posible la detección de depósitos de materiales arenosos sueltos en superficie cuando los focos de erosión activa alcanzaron dimensiones considerables.

2. Materiales y métodos

2.1. Preparación de la información espectral y topográfica

Para efectuar este estudio regional fueron requeridas tres escenas de satélite Landsat con la finalidad de cubrir la totalidad del área de estudio (path/row 229/084, 229/083, 228/084).

Las imágenes fueron seleccionadas dentro del periodo comprendido entre enero y marzo, de los años 2007, 2008, 2015, 2017, 2019¹¹; de acuerdo con Marini *et al.* (2007) quienes mencionan que durante el período estival y dependiendo de las fechas de siembra, los principales cultivos agrícolas de la Región Pampeana Argentina, alcanzan su máximo crecimiento. En esta ventana de tiempo, la mayoría de los cultivos agrícolas tradicionales y los montes deciduos presentan su mayor índice de área foliar [IAF].

La Bolsa de Cereales (2016) señala que los principales cultivos agrícolas estivales presentes en el sur de Córdoba son maíz, soja y maní. Según esta institución, el promedio de las fechas de siembra indica que para la primera quincena de enero el 90% del cultivo de maíz del sur de Córdoba se halla sembrado. Y, según la Bolsa de Cereales de Córdoba [BCCBA], para la primera quincena de julio se encuentra cosechado solo el 50% de la superficie con maíz, comenzando la primera quincena de marzo. Por otro lado, para soja, indica que durante la primera quincena de abril se alcanza el 70% de la superficie cosechada, iniciándose en la primera quincena de marzo (BCCBA, 2019).

Las imágenes satelitales de *Landsat 8 Operational Land Imager* (OLI) y de *Landsat 5 Thematic Mapper* (TM) Nivel 2 fueron provistas por el Servicio de Geología de los Estados Unidos¹² [USGS, por sus siglas en inglés]. Las mismas fueron seleccionadas en función de la cobertura nubosa (máximo admisible 10%), corregidas atmosféricamente a reflectancia en superficie del suelo, en el caso de Landsat 5 TM, mediante el algoritmo *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System* (LEDAPS) (Masek *et al.*, 2006), y, en el caso de Landsat 8 OLI, usando *Land Surface Reflectance Code* (LaSRC) (Vermote *et al.*, 2016).

¹¹ Las fechas de las escenas empleadas están disponibles en la Tabla 44, ANEXO I.

¹² Página Web del Servicio de Geología de los Estados Unidos <https://www.usgs.gov/>

El sistema de referencia de coordenadas empleado fue Universal Transversal de Mercator [en inglés, *Universal Transverse Mercator*, UTM] 20 zona sur (EPSG: 32720). Se trabajó con una resolución espacial de 30 metros sobre un mosaico construido con un buffer de 300 metros, a los fines de evitar pérdidas de información en los píxeles de los bordes del área de estudio.

Utilizando las bandas corregidas, se construyeron dos índices espectrales: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada [NDVI, por sus siglas en inglés] y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo [SAVI, por sus siglas en inglés], con el objetivo de analizar su capacidad para separar coberturas. Por otro lado, fue construido un modelo digital de elevación de la región [DEM, por sus siglas en inglés] con escenas provistas por el Instituto Geográfico Nacional Argentino [IGN]; y fue incluido como covariable en el análisis conjuntamente a las bandas espectrales y a los índices mencionados anteriormente. Según los resultados de un estudio llevado a cabo por Gislason *et al.* (2006), la elevación fue la única variable topográfica con relevancia en la separación de coberturas.

Para ejecutar estos procesamientos se empleó el paquete “*raster*” (Hijmans, 2019) para el software R (R Core Team, 2019).

2.2. Coberturas y verdades de campo

Inicialmente fueron definidas 16 clases de coberturas, que finalmente fueron re clasificadas en 10: “Forrajes”, “Soja”, “Maíz”, “Maní”, “Pastizales”, “Montes” (dispersos y densos), “Arena”, “Agua”(profunda y superficial), “Misceláneas” (urbanizaciones) y “Otras” (Otros cultivos con menor implicancia en superficie como girasol, suelos sin cobertura, suelos salinizados, suelos arados).

Para construir una base de verdades de campo confiable incluyendo las coberturas identificadas, fueron efectuados numerosos viajes a lo largo de la región siguiendo vías de circulación primarias y secundarias durante el período comprendido entre los años 2016 y 2019. Durante estos viajes, se georreferenciaron lotes con los principales cultivos agrícolas de la región. Cultivos sobre vías de circulación terciarias fueron registrados en función de la accesibilidad de los caminos. Información previa a la fecha de inicio del proyecto, de tipo

secundaria, fue brindada por productores regionales, la Asociación Argentina CREA y la Agencia de Extensión Rural INTA Huinca Renancó.

Dado que se sugiere que para aquellas clases con mayor superficie la proporción de verdades de campo sea mayor, no solo fueron identificados para ellas más puntos a campo, sino que, además, se empleó la técnica de “ventanas de píxeles” sobre aquellos lotes de gran extensión y de superficies homogéneas (Kiema, 2002), con un mínimo de nueve píxeles. Fueron utilizados entre 4000 y 7500 puntos por año, fuertemente dependientes de la información disponible.

Los puntos fueron manualmente controlados y ajustados cuando fue necesario, ya que, en algunos sitios, la fluctuación de las napas con diverso grado de tenor de sales afectó la homogeneidad y supervivencia de los cultivos, principalmente en la campaña 2016/17. En un modo similar a White y Roy (2015) y Müller *et al.* (2015) las áreas naturales con montes, pastizales, agua superficial, eflorescencias salinas y los asentamientos urbanos fueron mejorados utilizando imágenes y series de tiempo de Google Earth (Google Earth Pro, 2018). Acumulaciones de arena en superficie fueron identificadas también con Google Earth Pro, que provee imágenes de mayor resolución espacial. Sin embargo, deposiciones de menos de 8100 m² no fueron tenidas en cuenta para situar puntos de control, dada la resolución de las imágenes espectrales empleadas para construir el set de covariables.

Aquellas verdades de campo correspondientes a forrajes, principalmente alfalfa o alfalfa consociada, fueron mejoradas a través de la técnica “ventana de píxeles” para cubrir la variabilidad inducida por sus diferentes estadios de pastoreo. Se visualizó un patrón particular asociado a los sistemas de pastoreo rotativos visitados en la región (Figura 24).

La digitalización de los puntos de control tomados a campo, su supervisión y ampliación fueron realizados con el software de acceso libre Q Gis Madeira v 3.4 (Q GIS Development Team, 2018).

Los valores del grupo de covariables que caracterizaron cada clase fueron extraídos de cada píxel de control mediante la función *extract* del paquete *raster* (Hijmans, 2019) para R (R Core Team, 2019). El 70 % de los puntos de control, seleccionados al azar, fue utilizado para el entrenamiento del modelo de clasificación, mientras que el 30 % restante fue reservado para llevar adelante el análisis de precisión de la clasificación.

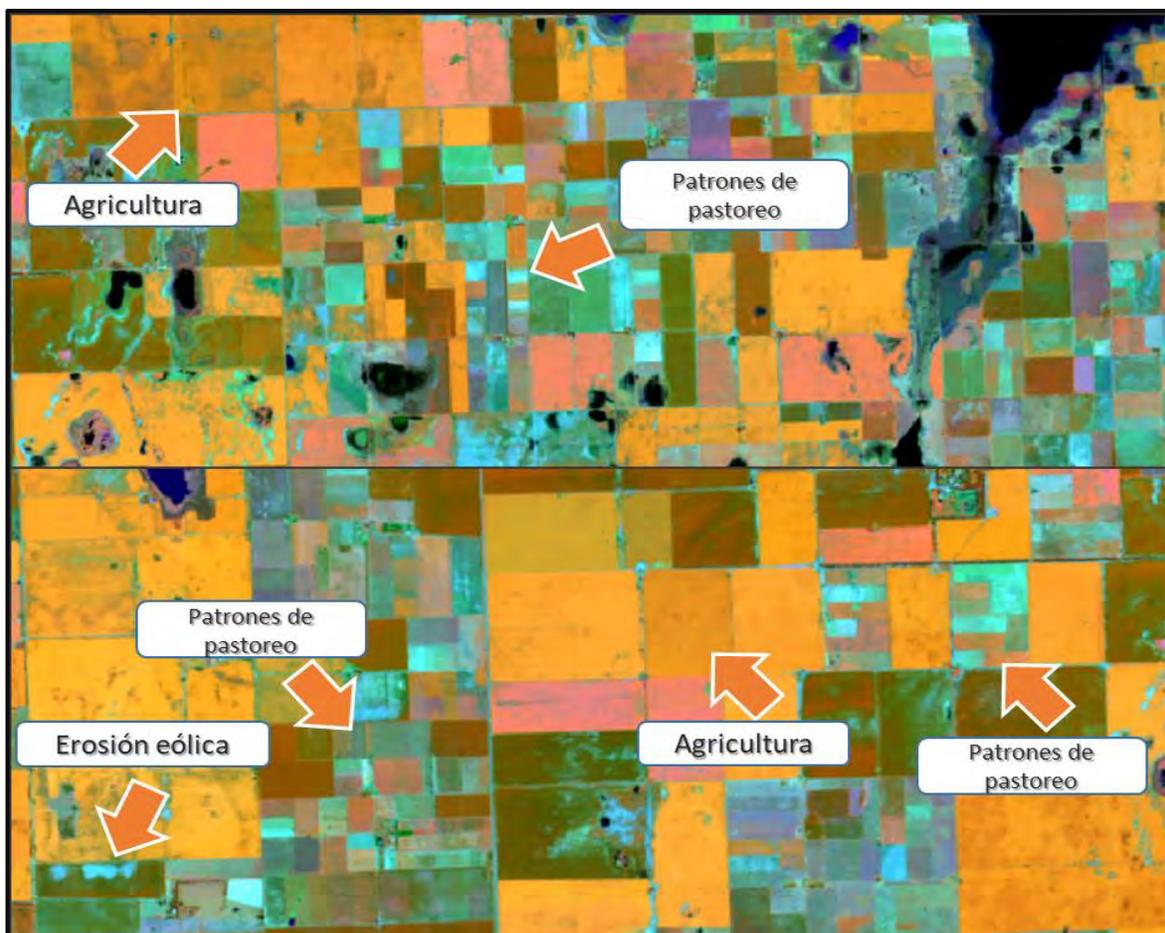


Figura 24. Visualización de la diferencia en tamaño de los patrones agrícolas respecto de los ganaderos. Patrones de avance del pastoreo de forrajeras. Focos de erosión eólica (Imágenes Landsat, composición falso color).

2.3. Selección de las covariables y de los parámetros del modelo

A los fines de evaluar la capacidad de separación de coberturas de todas las bandas espectrales de los satélites seleccionados, de los índices espectrales confeccionados –NDVI y SAVI- y de la covariable topográfica elevación representada por el DEM, se utilizó el algoritmo Boruta del paquete homónimo para el software R (Kursa y Rudnicki, 2010), en complemento con la observación de la variable “importancia” generada por el algoritmo Random Forest (Liaw y Wiener, 2002).

La importancia es una medición de la pérdida de precisión promedio en la clasificación con la inclusión o no de cada covariable, lo que se ve reflejado en el error OOB, es por ello

que es frecuentemente empleada como herramienta de reducción del número de covariables que conforman un modelo (Liaw y Wiener, 2002). Boruta utiliza una medida indirecta de la importancia de cada covariable en la clasificación, mientras que, Random Forest, provee directamente la medición de la importancia de las covariables; en este caso, se obtiene por la permutación al azar de los atributos que componen el modelo (Kursa y Rudnicki, 2010).

Generalmente, la reducción del número de covariables y la simplificación de modelos creados con RF, son llevadas a cabo mediante la visualización del error OOB y del coeficiente de Kappa (Nguyen *et al.*, 2018). El error OOB es relevante también en la selección de los dos parámetros requeridos por el modelo: el número de variables aleatoriamente seleccionadas para conformar los *split*¹³ en cada nodo, parámetro que recibe el nombre de *mtry*; y el número de árboles necesarios para construir el bosque aleatorio (*ntree*) (Janitza y Hornung, 2018; Nguyen *et al.*, 2018).

Algunos autores mencionan que la raíz cuadrada del número total de covariables empleadas, aproxima a un *mtry* adecuado (Liaw y Wiener, 2002; Gislason *et al.*, 2006). En este trabajo, la función *tuneRF* del paquete Random Forest fue empleada para obtener el valor del parámetro *mtry* en el que el error OOB fuera menor (Liaw y Wiener, 2002). El *mtry* establece el subconjunto aleatorio de covariables en cada nodo con el objetivo de evitar la correlación entre los clasificadores del ensamble, disminuyendo además el tiempo de procesamiento¹⁴.

Por otra parte, para definir el número de árboles empleados en el ensamble, fue utilizada la gráfica de la fluctuación del error OOB en función del *ntree*. El número de árboles seleccionado fue aquel en el que el error OOB tendió a estabilizarse.

2.4. Clasificación y evaluaciones de precisión

¹³ *Split*: nodo de un árbol de clasificación.

¹⁴ *Tiempo de procesamiento* = $cT\sqrt{M}N\log(N)$ donde *c* es una constante, *T* es el número de árboles en el conjunto, *M* es el número de variables y *N* es el número de muestras en el conjunto de datos (Breiman, 2003).

La clasificación supervisada de cada año fue ejecutada empleando el modelo creado con Random Forest entrenado con el 70% de los datos de campo. Mediante la función *predict* se asignó a cada pixel de la región una de las dieciséis clases definidas.

El mismo procedimiento fue aplicado sobre el 30% de los puntos apartados con anterioridad para efectuar la validación externa. Con los valores predichos y los observados fue construida una matriz de confusión para cada año con la finalidad de obtener los indicadores exactitud global, exactitud del productor (complemento error de omisión), exactitud del usuario (complemento error de comisión) y el índice de Kappa.

Finalmente, fue realizado un procedimiento de post-clasificación con la función *reclassify* del paquete *raster* para unificar las clases cercanas y mejorar la visualización de las clases de interés en el mapeo final. Además, se aplicó la función *focal* del mismo paquete para reducir el ruido presente en la imagen mediante una matriz de 3 x 3 que representó aproximadamente 1 ha, utilizando la moda de sus píxeles. No se trabajó con una matriz mayor, dado el tamaño de las parcelas de los establecimientos ganaderos. Pero cabe mencionar que, en zonas exclusivamente agrícolas, esta matriz puede ampliarse.

3. Resultados y discusión

3.1. Selección de las covariables

De todas las covariables propuestas para conformar el predictor, ninguna de ellas fue descartada por el algoritmo Boruta. Es decir que todas contribuyeron en mayor o en menor medida a la identificación de las coberturas analizadas. De todos modos, es relevante mencionar que algunas bandas espectrales y el DEM presentaron mayor importancia, superando al resto de las covariables. Los resultados obtenidos con Boruta fueron coincidentes con aquellos procedentes de RF.

La selección de la elevación como covariable a implementar en modelos de clasificación supervisada con RF, ha sido mencionada por Gislason *et al.* (2006). Estos autores encontraron que esta covariable fue el único atributo topográfico relevante en la diferenciación de coberturas, aún en un relieve montañoso. En las Figura 25 y 26 se observa la gran pérdida de exactitud que se tiene al retirar la covariable elevación del modelo, probablemente explicada por la asociación entre el uso designado a los suelos y su calidad, directamente influenciada por su posición en el relieve, determinante en su formación.

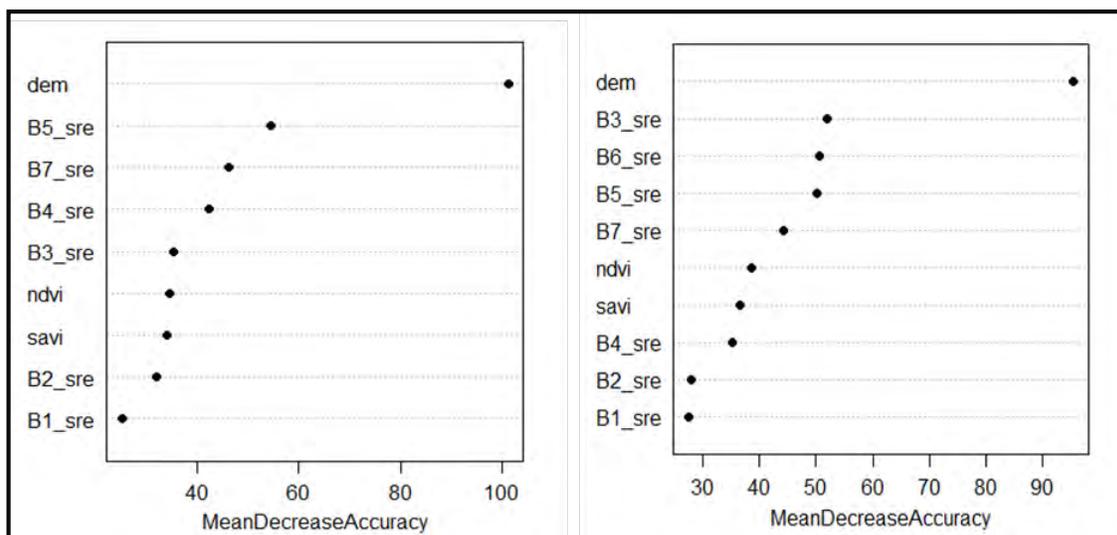


Figura 25. Pérdida de precisión ante la remoción en el modelo de cada una de las covariables, gráficos correspondientes a los años 2007 y 2019, generados con Random Forest.

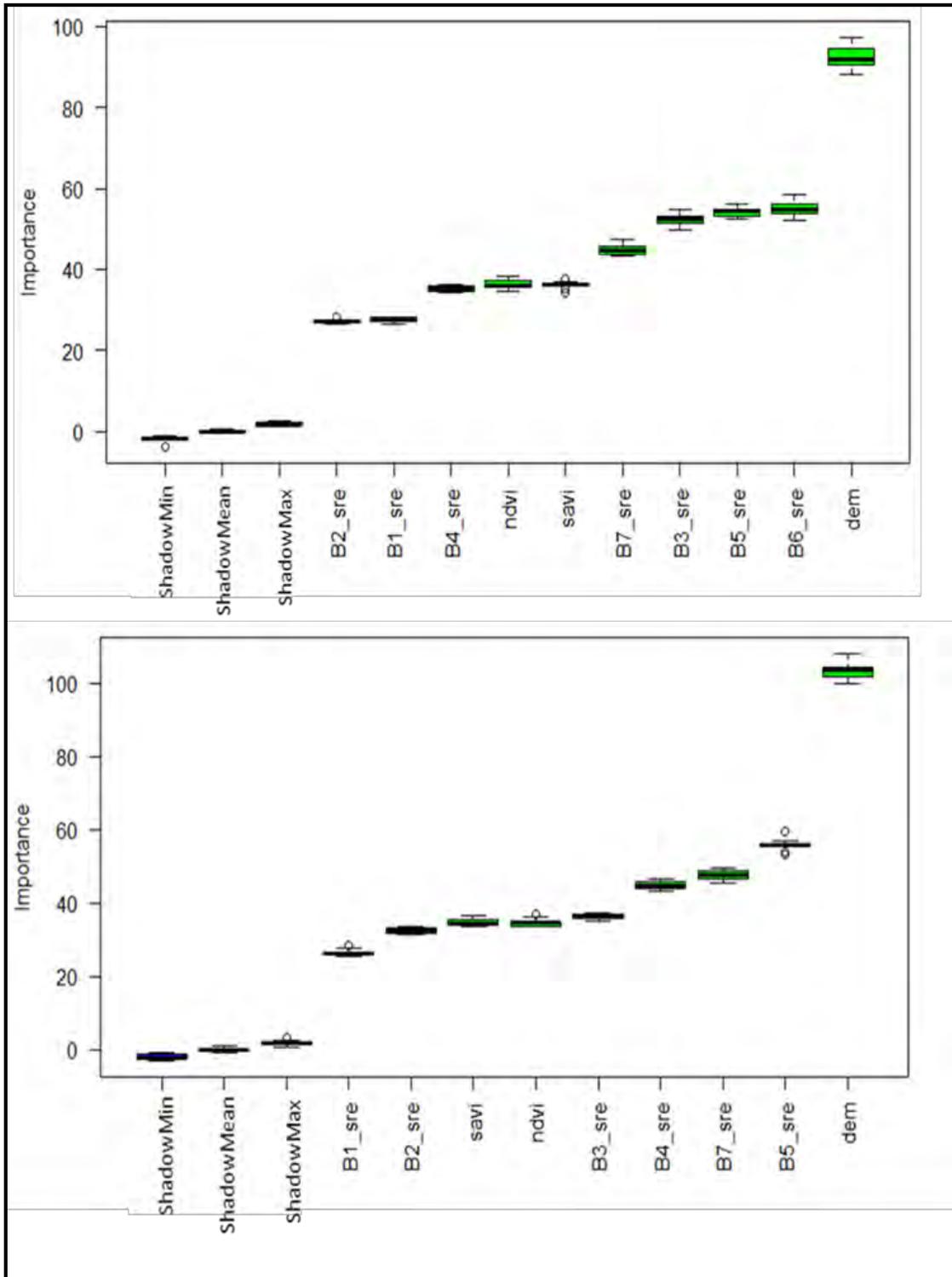


Figura 26 . Inferencia de la importancia de cada una de las covariables, gráficos correspondientes a los años 2019 y 2007, generados empleando Boruta. Las barras en verde corresponden a variables retenidas por el algoritmo. Se destaca la escasa variabilidad encontrada.

A continuación, en la Tabla 9 se listan las covariables seleccionadas para cada satélite.

Tabla 9. Covariables seleccionadas para componer el modelo de clasificación.

Satélite	Covariables		Longitud de onda (μm)
Landsat 8			
OLI	Banda 3	Verde visible	0,53 - 0,59
	Banda 5	Infrarrojo cercano (NIR)	0,85 - 0,88
	Banda 6	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR1)	1,57 - 1,65
	Banda 7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR2)	2,11 - 2,29
	DEM	Modelo digital de elevación	
Landsat 5			
TM	Banda 4	Infrarrojo cercano (NIR)	0,76 - 0,90
	Banda 5	Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR1)	1,55 - 1,75
	Banda 7	Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR2)	2,08 - 2,35
	DEM	Modelo digital de elevación	

Respecto de las covariables espectrales evaluadas, aquellas que presentaron mayor importancia fueron las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta en ambos satélites, y la banda verde del espectro visible para el sensor Landsat 8 OLI. El infrarrojo cercano ha sido empleado en la separación de clases exitosamente. Marini *et al.* (2007) y Marini (2008) lo incluyeron a través de la utilización del NDVI como se mencionó anteriormente, mientras que Arce (2004) emplearon esta banda conjuntamente con el rojo visible y el infrarrojo de onda corta para efectuar una clasificación no supervisada. Nelson (2017) menciona que la combinación óptima de bandas utilizando RF para separar coberturas boscosas, y que en su estudio logró el menor error OOB, incluyó una banda del espectro visible, dos del rango del infrarrojo –este autor empleó Sentinel 2 que tiene mayor resolución espectral que Landsat-, y una del infrarrojo cercano de onda corta. Salvando las diferencias entre los satélites, las bandas espectrales elegidas por este autor fueron semejantes a las que en este estudio se seleccionaron para Landsat 8, no así en el caso de Landsat 5, para el cual ninguna banda del espectro visible fue seleccionada.

Por otra parte, cabe mencionar que los índices espectrales incluidos en el presente estudio fueron menos “importantes” en la separación de clases que las bandas individuales mencionadas. Lo que probablemente se explique por el bajo nivel de importancia que tuvo la banda roja en ambos casos.

3.2. Determinación de los parámetros del modelo

El valor asignado al parámetro *mtry* por la función *tuneRF* fue de tres covariables en cada split, para ambos satélites.

Por otra parte, el número de árboles en el que el error OOB tendió a estabilizarse fue de 500 árboles para Landsat 5 y de 550 para Landsat 8. A modo de ilustración, en la Figura 27, se muestra como la variación del error OOB disminuye al incrementarse el número de árboles de clasificación empleados en el ensamble de uno de los años evaluados.

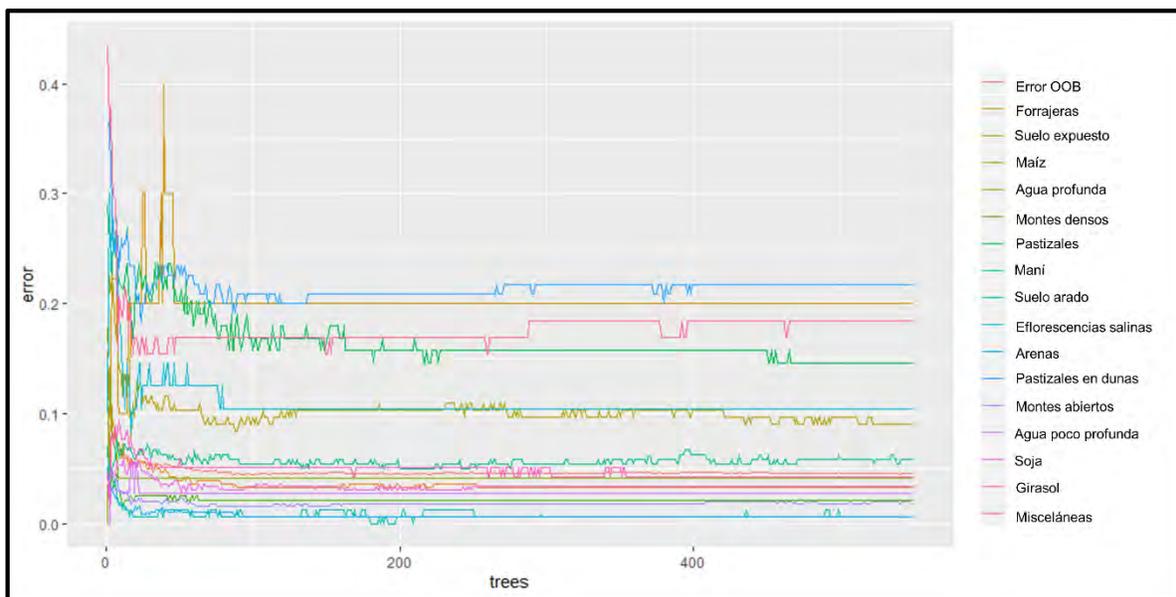


Figura 27. Varianza de la clasificación basada en el número de árboles.

Finalmente, los modelos utilizados fueron:

- Para Landsat 5 TM:

```
Model.rf <- randomForest (Class~B4_sre+B5_sre+B7_sre+dem, data=TrainSet,
importance=T, proximity=T, ntree=500, mtry=3)
```

- Para Landsat 5 OLI:

```
Model.rf <- randomForest (Class~B3_sre+B5_sre+B6_sre+B7_sre+dem, data=TrainSet,
importance=T, proximity=T, ntree=550, mtry=3)
```

3.3. Exactitud alcanzada por el modelo

La evaluación del desempeño del modelo como clasificador mostró una alta exactitud global (EG) y coeficientes de Kappa para todos los años incluidos en el análisis (Tabla 10).

Tabla 10. Parámetros e indicadores de exactitud de los modelos utilizados.

Año	ntrees	mtry	OOB error	Exactitud Global	Coef. de Kappa	Número de píxeles*
2007	500	3	2,19%	97,6%	0,973	7500
2008	500	3	3,15%	97,1%	0,968	4306
2015	550	3	2,55%	97,2%	0,967	6507
2017	550	3	4,50%	95,9%	0,955	4161
2019	550	3	4,54%	95,0%	0,945	4912

*Del número de píxeles, el 70% fue utilizado en el entrenamiento del modelo. El 30% restante fue apartado para constituir el set de validación.

Las clasificaciones que lograron los valores más bajos para los indicadores de exactitud calculados fueron 2017 y 2019, que, aunque fueron años para los cuales el número de puntos de entrenamiento fue menor -alrededor de cuatro mil puntos- se observó que en la campaña 2007/08 el número de puntos empleados fue similar, alcanzándose valores de EG y de Kappa superiores.

Esto sugiere que, si bien el número de puntos de control mejora la exactitud de las clasificaciones, la homogeneidad de las coberturas presentes en la imagen también es relevante. La campaña 2016/17 fue gravemente afectada por inundaciones y anegamientos que generaron heterogeneidad en las imágenes empleadas y condiciones de estrés en las

coberturas vegetales. Graesser y Ramankutty (2017) realizaron clasificaciones supervisadas a escala regional empleando un clasificador diferente *Extremely Randomized Trees* (ERT) y mencionan que cuando los patrones de cultivos fueron regulares los resultados de la clasificación fueron mejores. En este trabajo lograron mayor precisión en las Pampas Argentinas donde los patrones de cultivo son regularmente cuadrículados, mientras que, en el sur de Brasil, donde las formas del campo siguen los corredores de los árboles, los cuerpos de agua y la topografía la precisión fue menor. Los excesos hídricos de la campaña 2016/17 repercutieron directamente en los patrones de las coberturas agrícolas y forrajeras, mostrándose irregulares en cuanto a color y forma, e intercalándose con agua, sales y suelo expuesto.

Por otra parte, es necesario discutir la obtención de un promedio de 4% de error OOB, cuando el coeficiente de Kappa se aproximó a 0,96. Pareeth *et al.* (2019) obtuvieron un error OOB error promedio de 0,04 observando una exactitud del 96%. Según estos autores, un error OOB menor no garantiza una mayor exactitud en la clasificación.

Para visualizar cuales fueron las clases con más problemas en la clasificación se confeccionó una matriz de confusión promedio tras obtener los valores de todas las matrices de confusión de todos los años evaluados¹⁵ (Tabla 11). En ella, pudo apreciarse que los errores de omisión más altos han sido registrados para las clases suelos desnudos y asentamientos urbanos, cuyas reflectancias se han visto confundidas con la de suelos con eflorescencias salinas en superficie, pastizales, arenas y monte abierto. Es decir, que píxeles que pertenecían a las clases suelos desnudos y urbanizaciones fueron asignados a las restantes clases mencionadas.

En la clase pastizales se observó uno de los errores de omisión más alto, ya que sus píxeles fueron asignados a la categoría pastizales en dunas. En un principio, cuando fueron planteadas las posibles clases a encontrar en el área de estudio, se hipotetizó que los pastizales en los planos podrían tener reflectancias diferentes a aquellos que crecían en los médanos. Finalmente, ello no fue así y por este motivo surgió esta dificultad en la separación de ambas clases. Por lo antedicho, la exactitud del productor que presentaron los pastizales fue una de las menores con un valor de 86,21%. Posteriormente, en una etapa de post-clasificación,

¹⁵ Matrices de confusión para cada año disponibles en Anexo I. Tabla 40.

ambas clases fueron recategorizadas dentro de una única cobertura que se denominó “pastizales”.

En cuanto al maíz, los píxeles que pertenecían a este cultivo y fueron asignados erróneamente a otras clases, fueron confundidos en primer lugar con soja y en segundo lugar con forrajeras. La exactitud del productor para esta clase fue en promedio del 94,14%. Por otra parte, la cobertura soja presentó en promedio errores de omisión por asignación de píxeles a maíz en primer lugar y en segundo lugar a maní, logrando una exactitud del productor del 97,16%. El cultivo de maní tuvo una exactitud del productor mayor a la anterior, de 98,08%, siendo los píxeles de esta clase confundidos principalmente con la clase forrajeras, probablemente por su cercanía botánica con la alfalfa, que implica una reflectancia más similar a esta que a soja, otra integrante de la familia botánica de la que difiere marcadamente en cuanto a tamaño de sus folíolos y porte.

La clase forrajeras presentó una exactitud del productor de 97,84%, los píxeles pertenecientes a esta clase asignados erróneamente a otra clase, fueron principalmente confundidos con maíz y maní.

En general, los errores de comisión fueron bajos, excepto para la clase pastizales en dunas, lo que se explica por lo anteriormente expuesto.

Tabla 11. Matriz de confusión promedio para las 16 clases utilizadas en la clasificación supervisada. 1: forraje, 2: suelo desnudo, 3: maíz, 4: agua profunda, 5: monte cerrado, 6: pastizales, 7: maní, 8: suelos arados, 9: eflorescencias salinas, 10: arena, 11: pastizales en dunas, 12: monte abierto, 13: agua superficial, 14: soja, 15: girasol, 16: urbanizaciones. En amarillo-rojo píxeles clasificados erróneamente –a mayor intensidad en el gradiente de color mayor error-, en blanco píxeles asignados correctamente, en verde ausencia de error. *En el Anexo I, Tabla 38: matrices de confusión para cada año.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	EC	EU
1	208	0	1,4	0	0,2	0	1,8	0	0	0	0	0	0	1	0	0,2	0,02	97,60
2	0	46,4	0	0	0	1	0	0	0,2	0,4	0,2	0	0	0,4	0	0,2	0,03	97,36
3	1,4	0	139	0	0,2	0	0,2	0	0	0	0,6	0	0	3,2	0,4	0,2	0,06	93,64
4	0	0	0	26,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0	0	0	0,04	95,84
5	0	0	0,2	0	95,4	0,2	0	0	0	0	0,8	1	0,2	0	0	0	0,03	97,33
6	0,2	0,2	0	0	0,2	46,6	0	0	0	0,2	1,4	0,2	0	0	0	0	0,05	94,82
7	1,2	0	0,4	0	0	0	209	0	0	0	0	0	0	0,8	0	0	0,02	98,15
8	0	0,2	0,4	0	0	0	0	48,2	0,6	0,6	0,2	0	0	0	0,2	0	0,03	96,75
9	0,2	1	0	0	0	0	0	0	58,2	0,2	0,2	0	0,2	0,2	0	2,2	0,06	93,86
10	0,2	1,6	0,2	0	0	0	0	0	0	190	0,4	0	0,2	0	0,4	2,2	0,03	97,27
11	0,6	1,6	0,2	0	0	4	0	0	0	1	83	0,8	0	0,4	0	0,6	0,10	89,59
12	0	0,2	0,2	0	0,2	2	0	0	0	0	1,4	87	0	0	0	0	0,04	95,50
13	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	20,4	0	0	0	0,07	93,33
14	0,2	0,4	2,4	0	0	0	0,4	0	0	0	0,6	0	0	249	0,2	0	0,02	97,93
15	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	0	0,2	0,2	0	0	44,8	0,4	0,03	96,72
16	0,4	0,4	0	0	0	0	0	0	1	0,4	0	0	0	0,2	0	39,4	0,07	93,36
EO	0,02	0,10	0,06	0,02	0,01	0,14	0,02	0,07	0,04	0,02	0,07	0,03	0,08	0,03	0,03	0,16		
EP	97,84	89,83	94,14	98,33	99,23	86,21	98,04	93,33	95,57	98,44	92,6	97,00	91,62	97,16	96,95	84,42		

*EO: error de omisión; EC: error de comisión; EP: exactitud del productor (%); EU: exactitud del usuario (%).

La metodología empleada permitió la identificación y el mapeo de las principales coberturas presentes a escala regional 1:200.000 en toda la extensión de la Pampa Medanosa Cordobesa (Figura 28). La superficie cuantificada en el presente estudio estuvo sujeta al momento de pasaje del satélite, sin embargo, los mapas obtenidos permitieron el análisis de los cambios en las coberturas a través de los años. Cabe mencionar que las zonas con coberturas degradadas y/o heterogéneas a causa de inundaciones, anegamientos y salinización, fueron las áreas donde se percibieron los mayores desajustes del clasificador. En superficies con coberturas homogéneas, se observó que la separación entre clases no presentó dificultades más que efectos de bordes. Las áreas bajo agricultura, en general, se encuentran asociadas a los sectores más productivos, a ellas se destinan los mejores suelos y, por consiguiente, presentaron menos afecciones por condiciones hidrohalomórficas. Exceptuando la campaña 2016/17 en la que los excedentes hídricos no previstos no pudieron ser tenidos en cuenta en la planificación y gran parte de la superficie agrícola se vio afectada, generando heterogeneidad en las coberturas que dificultó la clasificación.

Es interesante destacar que la metodología logró, además, separar la clase “Arenas”. Con la inclusión de esta categoría lo que se pretendió fue explorar la utilidad de la metodología para efectuar el monitoreo de procesos de erosión eólica (Figura 28.d). Si bien el modelo fue exitoso al demarcar sedimentos eólicos superficiales, es necesario subrayar que la superficie detectada estuvo condicionada por la resolución espacial del sensor elegido. A resoluciones como la empleada en el presente trabajo, cuanto más avanzados los procesos erosivos, mejor fue su identificación. Por lo tanto, esta metodología es de utilidad para identificar grandes voladuras y depósitos de arenas, pero no para crear estrategias de prevención o de acción en momentos de inicio del proceso de erosión.

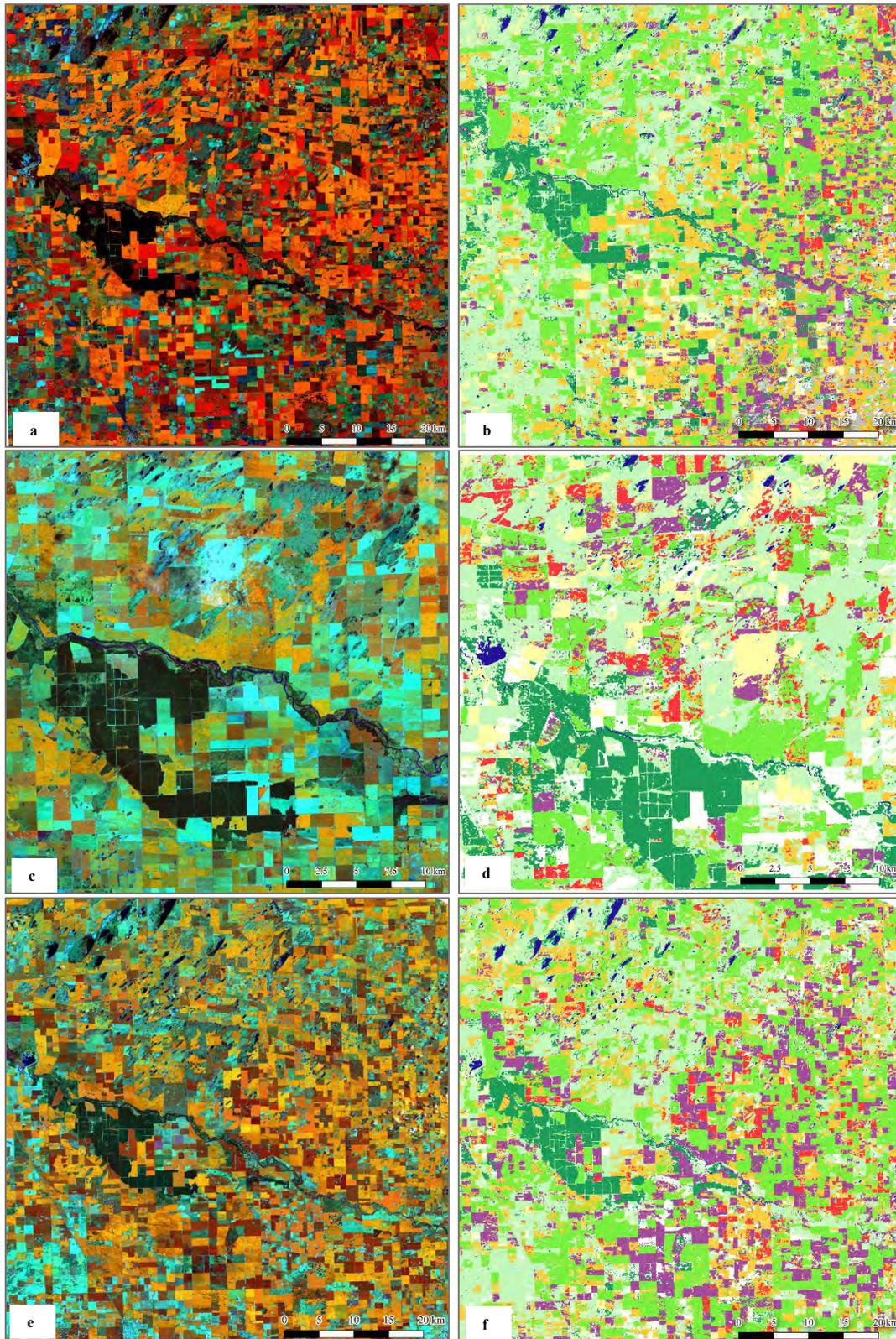


Figura 28. Izquierda: composiciones falso color mejorado **a)** 2007, **c)** 2015, **e)** 2019. Derecha: Clasificaciones **b)** 2007 **d)** 2015 **f)** 2019. Ubicación: cercanías de Villa Sarmiento (Pcia. de Cba).

■ Forrajes; ■ Montes; ■ Soja; ■ Pastizales; ■ Maíz; ■ Maní;
■ Arena; ■ Agua; ■ Otras.

3.4. Cambios en las coberturas y usos de la tierra: el avance de la frontera agrícola y el desplazamiento de los sistemas de producción mixtos, la relocalización del maní y el estado de las coberturas naturales.

Según un estudio realizado por Viglizzo *et al.* (2010) en el que se evalúa como último período aquel comprendido entre 2001 y 2005, el frente de avance de la frontera agrícola bajo condiciones de secano, sobre el sur de Córdoba, había adquirido un estado estacionario. El estudio realizado muestra que el avance de la frontera agrícola continuó desplazando este frente hacia el oeste. La observación y cuantificación de la superficie desde la campaña 2006/07 permitió identificar que la expansión agrícola en el área de estudio ocurrió fundamentalmente a partir de la campaña 2007/08, confirmando que los principales cultivos agrícolas estivales realizados en la región a partir de ese ciclo no difirieron de los dominantes a nivel nacional: maíz y soja (Tabla 12); siendo esta última la que logró mayor ocupación. Estos resultados coinciden con lo expuesto por Genero (2018) para el departamento General Roca.

Tabla 12. Superficie clasificada por Random Forest para diferentes coberturas vegetales.

Campaña	Cobertura	Superficie (ha)	Variación (%)*	Variación (%) relativa a 2007
2006/07	Forraje	359.858		
2006/07	Soja	199.788		
2006/07	Maíz	99.403		
2006/07	Maní	19.668		
2006/07	Pastizales	233.525		
2006/07	Montes	123.750		
2007/08	Forraje	135.002	-62%	-62%
2007/08	Soja	341.816	71%	71%
2007/08	Maíz	205.276	107%	107%
2007/08	Maní	93.240	377%	377%
2007/08	Pastizales	202.185	-13%	-13%
2007/08	Montes	120.715	-2%	-2%

2014/15	Forraje	144.981	7%	-60%
2014/15	Soja	205.491	-40%	3%
2014/15	Maíz	185.835	-9%	87%
2014/15	Maní	62.799	-33%	219%
2014/15	Pastizales	232.606	15%	0%
2014/15	Montes	110.399	-9%	-11%
2016/17	Forraje	209.409	44%	-42%
2016/17	Soja	308.997	50%	55%
2016/17	Maíz	266.229	43%	168%
2016/17	Maní	97.384	55%	395%
2016/17	Pastizales	253.984	9%	9%
2016/17	Montes	86.399	-22%	-30%
2018/19	Forraje	178.932	-15%	-50%
2018/19	Soja	349.674	13%	75%
2018/19	Maíz	266.335	0%	168%
2018/19	Maní	44.713	-54%	127%
2018/19	Pastizales	244.588	-4%	5%
2018/19	Montes	81.313	-6%	-34%

**La variación porcentual es relativa al año anterior.*

Por otra parte, fue posible observar la dirección de avance de la frontera agrícola. Las coberturas correspondientes a los principales cultivos agrícolas estivales de la región comenzaron a ganar superficie en el período evaluado desde el sector noreste y este (Figura 29), reemplazando sistemas de producción mixtos y reduciendo la diversidad en los agroecosistemas, que décadas atrás en el sector sur-sureste de la región rotaban alfalfa, maíz y girasol e incluían el cultivo de trigo o verdeos invernales¹⁶. Es decir, que la ganancia de superficie agrícola en la Pampa Medanosa, desde 2006/07 hasta la actualidad ha sido principalmente en base al desplazamiento de los sistemas mixtos agrícola-ganaderos. Reportados con mayor frecuencia sobre el este del departamento Gral. Roca y sobre el departamento Roque Sáenz Peña, ya que hacia el oeste del departamento General Roca, en el Dpto. Juárez Celman y en el Dpto. Río Cuarto predominan los sistemas productivos con planteos agrícolas (Bolsa de Cereales, 2016). Algunos autores explican este avance de la frontera agrícola sobre tierras antiguamente ganaderas o mixtas por incrementos en las lluvias

¹⁶ Comunicación personal con productores locales.

recibidas anualmente en la Región Pampeana Semiárida Argentina (RPSA), mejorando las condiciones para cultivos agrícolas de secano (Viglizzo *et al.*, 1995; Sierra y Pérez 2006).

La superficie asignada por la metodología empleada a la categoría *forrajeras* –alfalfa o consociaciones de esta especie con otras forrajeras– fue de 359.858 ha para 2006/07. La reducción de este tipo de coberturas que se observó en 2018/19 relativa a la campaña 2006/07 fue del 50% (Tabla 12). A lo largo del período evaluado, la gran caída de la superficie forrajera se identificó en la campaña 2007/08 (135.002 ha). Sin embargo, es relevante tener presente que Marini *et al.* (2007) mencionan que la heterogeneidad en el crecimiento de las coberturas pastoreadas reduce la precisión en la identificación de los forrajes. Estos autores señalan, además, que el suelo desnudo y las pasturas degradadas pueden ser confundidos con pastizales secos, afectando la estimación de la superficie. Durante la realización del presente trabajo se observó que superficie de uso ganadero, desprovista de coberturas o bajo pasturas muy degradadas, no es contabilizada por esta metodología como tal, sino que es asignada a la clase suelo desnudo o pastizales, ya que en ese momento la reflectancia de esa superficie fue muy diferente a la del forraje con su máximo verdor. Por consiguiente, si se pretendiese obtener la superficie total de cada uso del suelo, el análisis debiera mejorarse siendo planificado en función de los límites temporales de la actividad.

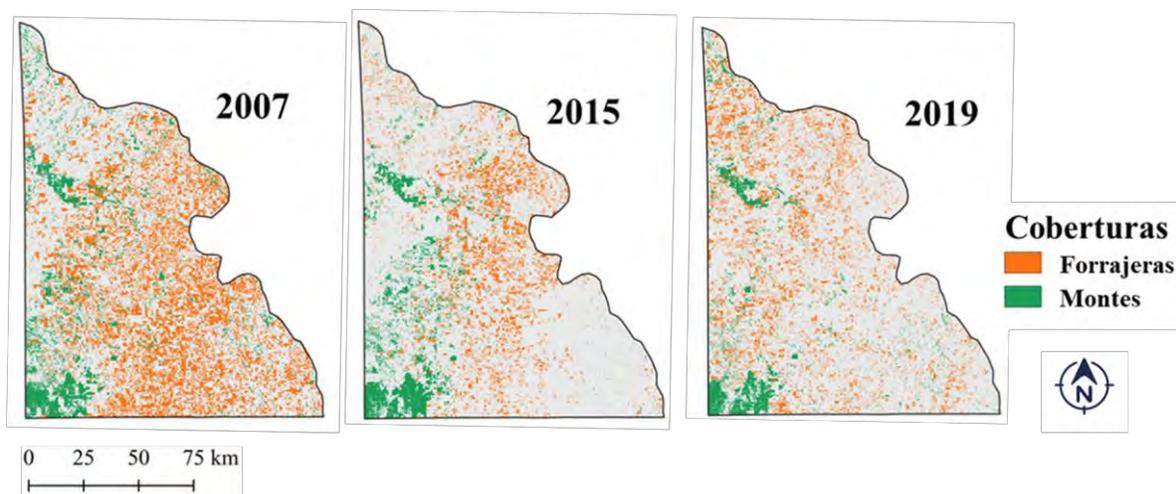


Figura 29. Variación de la superficie designada a forrajeras estivales en la Pampa Medanosa.

En las campañas 2014/15 y 2018/19 se observó una leve recuperación de la superficie con 178.932 ha en 2018/19. Si bien la campaña 2016/17 continuó con la tendencia marcada

por los mencionados ciclos, su superficie fue muy superior a la 2018/19. Teniendo presente que su error de comisión fue mayor que el de las demás coberturas de interés, y observándose además píxeles que debieron ser clasificados como maíz y maní asignados a la categoría forrajeras, se percibe una probable sobrestimación de la superficie de esta clase durante el ciclo 2016/17; probablemente consecuencia de las condiciones de los cultivos afectados por los excesos hídricos y la heterogeneidad de las imágenes. La clasificación efectuada para 2018/19 logró un valor de exactitud del usuario superior¹⁷, que marca un incremento de la superficie forrajera de 33.951 ha respecto a 2014/15 y que representa aproximadamente un 23%. SENASA (2018) menciona un incremento del stock ganadero del 4% en toda la provincia para el año 2018 y la Secretaría de Agroindustria de la Nación (2019) un mantenimiento del stock en 2019.

Por otra parte, como datos estadísticos de referencia para evaluar el desempeño del clasificador, puede citarse el Censo Nacional Agropecuario 2008 [CNA 08]¹⁸, teniendo presente que la presentación de los datos en el mismo está fraccionada por departamentos y que la Pampa Medanosa pertenece en un 74% (1.040.437 ha) al departamento General Roca y el 26% restante (375.309 ha) al departamento Río Cuarto, la comparación con los datos del censo es solo una aproximación. El CNA 08 registró 160.648 ha de forrajeras perennes en el Dpto. Gral. Roca, los valores de forrajeras de la medanosa estuvieron por debajo de este valor, situación que es coherente ya que este departamento no es ocupado plenamente por el área del estudio y que los sistemas mixtos como se mencionó anteriormente son más frecuentes hacia el este del departamento, que excede los límites de la Pampa Medanosa.

Respecto a los dos cultivos agrícolas que se posicionaron primeros en cuanto a superficie, maíz y soja, la cobertura asignada a la categoría *maíz* mostró incrementos del 107% durante la campaña 2007/08 (205.276 ha) respecto a la identificada para su campaña anterior, registrándose en 2016/17 266.229 ha y 266.335 ha en 2018/19. Con un incremento de 168% en 2018/19 respecto a 2006/07 (Figura 30). Según la Dirección de Estimaciones Agrícolas

¹⁷ Ver Anexo I. Tabla 45. Matrices de confusión derivadas de las clasificaciones supervisadas efectuadas para los años 2007, 2008, 2015, 2017 y 2019.

¹⁸ El período de referencia del CNA 2008 es aquel comprendido entre el 1º de julio de 2007 y el 30 de junio de 2008. INDEC, Censo Nacional Agropecuario 2008.

(2019), la superficie sembrada con cultivo de maíz en 2006/07 fue de 90.000ha en el Dpto. Gral. Roca. Para el mismo departamento, la BCCBA reportó en 2016/17 194.286, y 285.531 ha en 2018/19. Esto indicaría que la tendencia percibida al emplear el algoritmo de clasificación Random Forest es similar a la reportada por organismos institucionales, observándose una sobre estimación en la campaña 2016/17, en la que ya fueron mencionadas las dificultades encontradas durante la realización de la clasificación ante la heterogeneidad de las coberturas afectadas por los excesos hídricos. El error de comisión aquí estuvo dado por la asignación de pixeles de forrajes, pastizales, soja y girasol a la categoría maíz. La exactitud del usuario para maíz, junto con pastizales, fueron inferiores al resto de las clases de coberturas vegetales¹⁹.

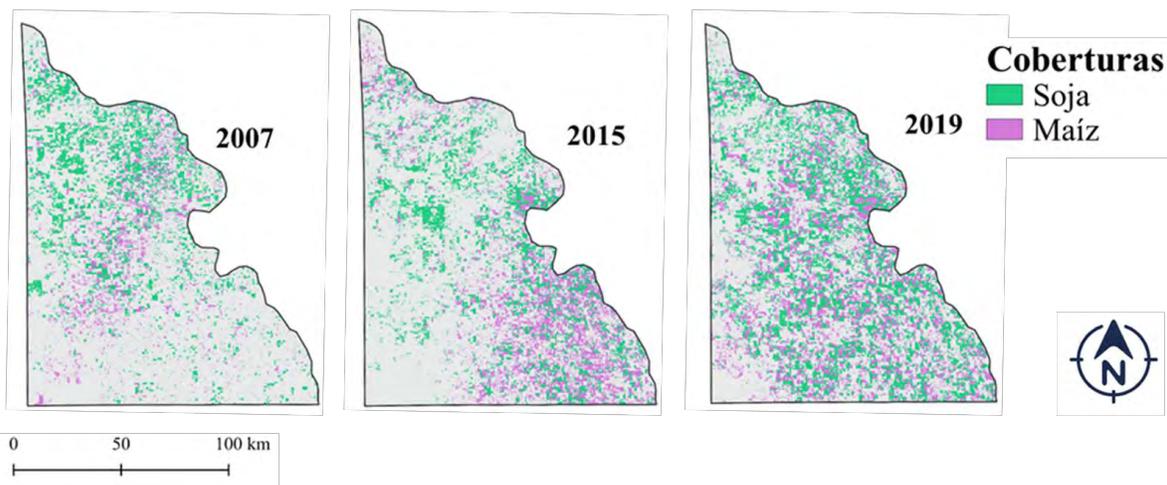


Figura 30 Variación de la superficie de maíz y de soja en la Pampa Medanosa.

En el caso de la *soja*, el aumento de 2007/08 respecto a su ciclo anterior fue del 71% - menor que el de maíz, ya que esta contaba inicialmente con más superficie- (Tabla 12), identificándose 341.816 ha. Para este ciclo, SIS-RIAN (2018) reportan 325.000 ha en el Dpto. Gral. Roca y el CNA 08 reportó 240.361 ha; mostrando la gran variabilidad entre los datos y exponiendo la necesidad de la implementación de las tecnologías de teledetección para mejorar las bases estadísticas ya que el empleo de información secundaria puede dar

¹⁹ Ver Anexo I. Tabla 2. Matrices de confusión derivadas de las clasificaciones supervisadas efectuadas para los años 2007, 2008, 2015, 2017 y 2019.

lugar a errores difíciles de estimar, que pueden ser reducidos y dimensionados con la incorporación de nuevas tecnologías complementarias en la realización de los censos.

La superficie identificada con soja para 2014/15 fue de 205,491 ha. Para la misma campaña tanto la BCCBA como SIS-RIAN reportaron valores en el Dpto. Gral. Roca muy superiores a los encontrados en la medanosa, 370.000 y 395.460 hectáreas respectivamente. Situación previsible dada la gran cantidad de suelo expuesto que presentaron las imágenes de 2015 desde el centro y hacia el oeste de la región (Figura 31). En 2016/17 la superficie bajo soja ascendió a 308.997 ha y en 2018/19 a 349.674 ha; este último valor representa un 75% en la variación de este cultivo respecto a la campaña inicial. Los resultados obtenidos se aproximaron a los datos departamentales obtenidos por la BCCBA, 329.000 ha y 349,000 ha para las dos campañas mencionadas, respectivamente. SIS-RIAN reportó 373.000 ha para 2016/17, y aún no presenta datos para la campaña 2018/19. En general todos los reportes consultados muestran un incremento de la superficie designada al cultivo de soja, que sustenta el acrecentamiento en área detectado por el algoritmo de clasificación e indican que la campaña en la que ocurrió la máxima diferencia incremental fue 2007/08.

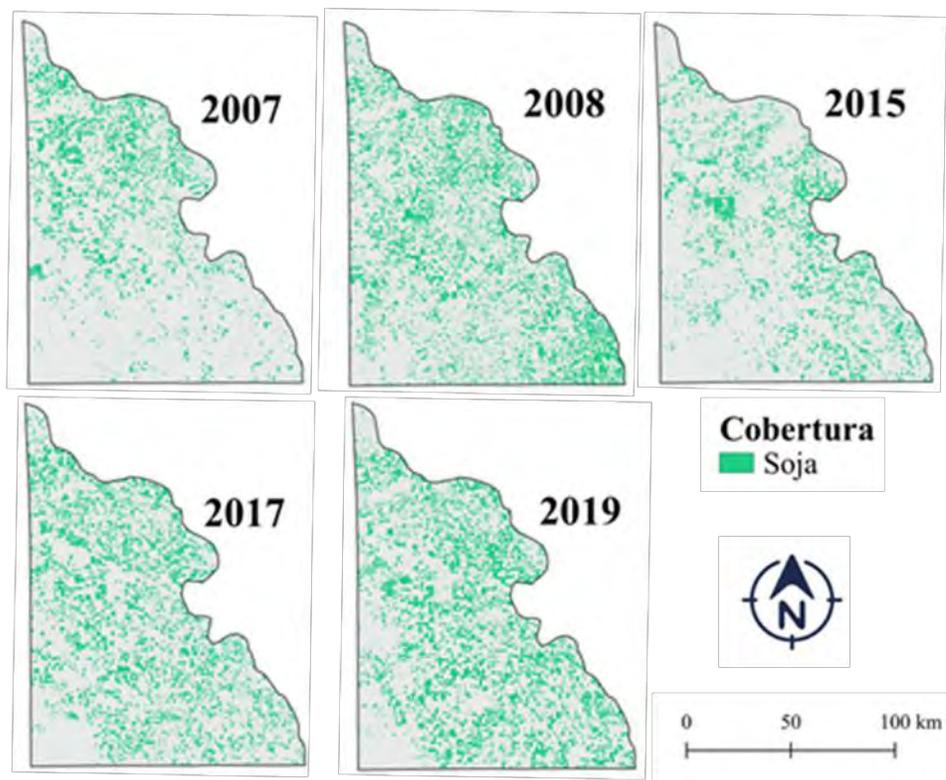


Figura 31. Variación de la superficie de soja en la Pampa medanosa durante el período 2006/07-2018/19.

Por otro lado, fue posible visualizar la presencia, aumento de área sembrada y desplazamiento del cultivo de *maní* dentro de la región. El primer registro que presenta SISRIAN (2018) data del año 1973/74 (19.500 ha), luego 3.500 ha en 1998/99 y finalmente adquiere continuidad a partir de 2000/01; con su primer salto incremental en superficie en 2006/07(41.000 ha) alcanzando su mayor extensión en 2013/14²⁰ con 133.000 ha. El algoritmo empleado logró identificar un área de 19.668 ha 2006/07 dedicada a este cultivo principalmente en la zona noreste y centro de la región. En 2014/15 se percibe un fuerte traslado del cultivo hacia el sureste, conservando superficie hacia el norte del río Quinto, y ya en 2016/17 se observan 93.384 ha dispersas en toda la región. Seguidamente, ocurrió su reubicación hacia el centro-este en el ciclo 2018/19 (Figura 32), en parte explicado por las inundaciones acaecidas en 2016/17 en el sur-sureste y, probablemente, por los procesos de

²⁰ Variación temporal del área sembrada con cultivo de maní en el Dpto. General Roca. Figura 105, Anexo I.

erosión eólica sobre el sector oeste. Ciampagna *et al.* (2019), mencionan el deslazamiento del cultivo hacia el norte por excesos hídricos y pérdidas económicas de la campaña 2016/17.

La identificación de lotes con cultivo de maní en los ciclos 2006/07 y 2007/08 presentó valores considerablemente inferiores a los reportes institucionales. Probablemente por el menor número de datos de entrenamiento reunidos para esos ciclos. Para la campaña 2016/17, el predictor arrojó valores similares a los departamentales reportados por SIS-RIAN y a los presentados por Fiant *et al.* (2015), 91.102 ha para todo el Departamento General Roca, utilizando en su clasificación supervisada el algoritmo Máxima Verosimilitud (MLC). Según la Dirección de Estimaciones Agrícolas (2019), la campaña en la que el cultivo de maní logró su máxima cobertura fue 2013/14 con 133.000 ha en el Dpto. Gral. Roca; basándose en información secundaria. Mientras que Fiant *et al.* (2015) reportaron 106.966 ha para el mismo departamento, empleando MLC.

Un hallazgo interesante fue que en la clasificación correspondiente a 2014/15, se registraron 34.858 ha de *arena o voladuras*, teniendo presente que el algoritmo solo detecta estos depósitos cuando sus dimensiones cobran importancia, y que, manualmente se digitalizaron 66.448 ha (ver Capítulo III), se obtiene que, de la totalidad de los focos de erosión/desertificación detectados en el capítulo anterior, el 53% en este ciclo adquirió dimensiones importantes²¹. En la campaña 2014/15, se identificó una mayor superficie de voladuras que se aprecia en la Figura 32, conjuntamente con la relocalización del cultivo de maní a través del tiempo. Durante el último ciclo evaluado, en 2018/2019 se identificaron 44.713 ha categorizados como maní, la menor superficie de los últimos años. Se hipotetiza que la principal causa de la relocalización del cultivo desde los departamentos Presidente Roque Sáenz Peña y General Roca habrían sido los excesos hídricos de la campaña 2016/2017, concentrándose la producción en los departamentos Río Cuarto, Juárez Celman y Tercero Arriba (Ciampagna *et al.*, 2019; Secretaría de Agroindustria, 2019).

La fluctuación de las napas y las inundaciones registradas durante la campaña 2016/17 dificultaron la clasificación de las coberturas, aunque no distorsionaron en gran medida los valores de superficie destinada a maní. La Dirección de Estimaciones Agrícolas (2019)

²¹ Se establece la comparación con esta campaña, ya que gran parte de las imágenes empleadas en la realización de la digitalización de los focos de erosión previstas por Google Earth Pro pertenecieron a este ciclo.

informa 9.500 ha no cosechadas en el departamento para esta campaña y 3100 kg. ha⁻¹ rendimiento promedio.

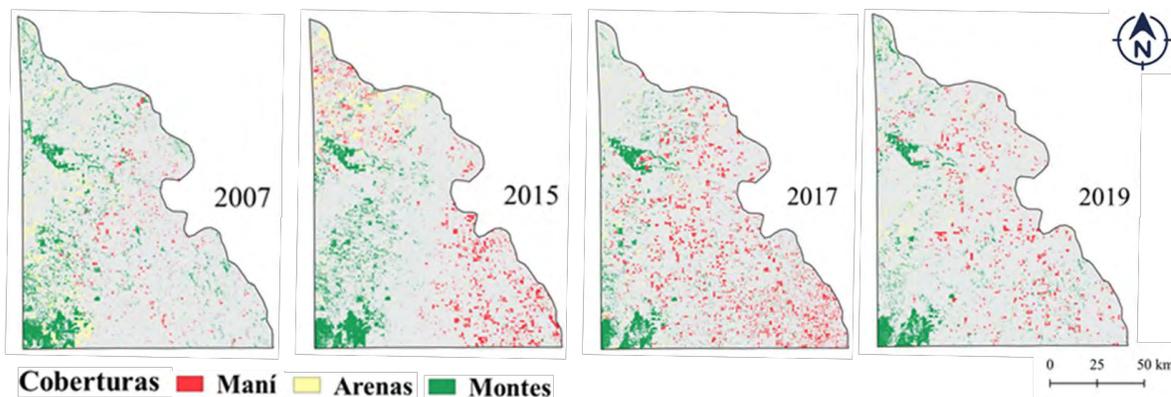


Figura 32. Desplazamiento del cultivo de maní en la Pampa Medanosa entre las campañas 2006/07-2018/19 y reducción de las coberturas arbóreas. En los años 2007 y 2015 se aprecian sedimentos eólicos en superficie.

Finalmente, respecto de las *coberturas vegetales naturales*, la mayor superficie cubierta por pastizales se identificó hacia el oeste de la región, extendiéndose hasta el límite con la provincia de San Luis. En cuanto a la cuantificación del área asignada a esta cobertura, la misma no exhibió grandes variaciones a lo largo del tiempo en el periodo de tiempo analizado, pudiendo explicarse por su presencia sobre suelos los de menor evolución de la región, de texturas arena francas a arenosas, dunas y paleo dunas (Ver Capítulo III). Es decir, que pudo observarse que los pastizales han permanecido en el tiempo en aquellos suelos no aptos para usos agrícolas.

El Censo Nacional Agropecuario 2008 registró 107.825 ha de pastizales naturales en el Dpto. Gral. Roca y 148.584.8 en el Dpto. Río Cuarto. Observando estos valores, teniendo presentes el área de cada departamento que ocupa la región y comparándolos con la superficie clasificada dentro de la categoría pastizales por RF, se deduce que probablemente el algoritmo haya sobrestimado la extensión de los pastizales en este ambiente semiárido. Marini *et al.* (2007) señala que los NDVI encontrados para médanos, suelos desnudos, pasturas degradadas y campos naturales fueron similares e inferiores a 0,6, agrupándolos en

una misma categoría. El NDVI incluye en su cálculo la banda de infrarrojo cercano que es una de las covariables empleadas en modelo obtenido. Para el caso de estudio, como se mencionó anteriormente, la clase pastizales incluyó la sumatoria de las superficies de las subcategorías pastizales en dunas y pastizales. Para la primera de ellas la exactitud del usuario de la clasificación 2008 indicó una sobre estimación por confusión con la categoría monte cerrado, pero además se vio afectado el cálculo de la superficie al existir confusión entre la categoría pastizales y la de monte abierto que en el mismo año afectó la exactitud del productor, aunque en menor medida que al anterior indicador (Anexo I, Tabla 45).

Las coberturas arbóreas mostraron reducciones del 34% durante el período de tiempo analizado, resultado obtenido al comparar el área bajo montes en el último año del análisis con aquella del año inicial (Figura 32). Es necesario resaltar que la metodología empleada, no permitió diferenciar entre especies de árboles y, por lo tanto, no se tiene evidencia de que la reducción haya sido exclusivamente de especies pertenecientes al monte nativo de Caldén. Para ello, la metodología debiera ser mejorada utilizando imágenes satelitales con mayor resolución espacial y espectral -hiperespectrales- e inclusive contrastada con otros algoritmos de clasificación, ya que Baumann *et al.* (2018) logró exitosamente la separación de clases de bosques.

El mapeo de la clasificación obtenida permitió la observación de dos sitios puntuales donde el monte presentó mayor densidad y coinciden con los indicados por Schneider (2005) y Cisneros *et al.* (2002), quienes mencionan que el Caldenal en la provincia de Córdoba se encuentra localizado principalmente en dos sectores bien definidos. El primero, sobre el curso del Río Quinto o Popopis en el suroeste del Departamento Río Cuarto y noroeste del Departamento General Roca, llegando hasta la localidad de Villa Sarmiento; y hacia el suroeste del Dpto. Gral. Roca, en la región conocida como Laguna El Cuero.

El relego de los montes en estos dos sectores tampoco es casual, a campo se observó que se encuentra asociado, por un lado, en la zona sur, a suelos arenosos y paleo dunas, principalmente conformado por isletas de Chañar. Mientras que, en la zona norte, mejor conservado, se lo observa sobre las laderas del río Quinto, relegado a áreas de derrame donde se formaron suelos coloquialmente llamados de “tierra negra” (Serie Ea. Sarmiento, Carta de suelos Río Cuarto-no publicada-). En la región estudiada, la cobertura vegetal nativa se observó fragmentada por la agricultura y en ocasiones con actividad ganadera bajo la misma.

Exceptuando la zona de Villa Sarmiento, donde el monte cerrado y denso dificulta el ingreso. Según Cantero *et al.* (2013) los parches han quedado relegados a sitios que no presentan aptitud agrícola por impedancias edáficas, replicándose la situación que se registró para los pastizales naturales.

El decreto 891/ 2003 del gobierno de la provincia de Córdoba crea el Corredor Biogeográfico del Caldén y del Chaco Árido en el marco del Plan Estratégico para la Diversidad Biológica 2011- 2020 con la finalidad de proteger especies amenazadas por la expansión de la frontera agropecuaria (Decreto 891, 2003). El Corredor Biogeográfico del Caldén según el mencionado decreto tiene como límites geográficos al río Quinto en el norte, a la Ruta Nacional N° 35 en el este y los límites provinciales en el oeste y sur; con un total de 62.305 ha de monte nativo (Schneider, 2005). Por lo tanto, es coherente que RF indique una superficie superior, ya que el área del estudio supera ampliamente la delimitada por el mencionado decreto. En la clasificación realizada con RF, la categoría montes en el sector sur llegó hasta los límites con la provincia de La Pampa y San Luis, pero se localizaron, además, montes hacia el oeste y sur oeste de la localidad Chaján, a la vera del arroyo homónimo y en campos naturales; y también hacia el este de la Ruta Nacional N° 35 fueron identificadas isletas de montes de menor tamaño.

Para el último año estudiado la superficie identificada como montes fue de 81.313 ha que representa el 4,8% del total de montes de la provincia de Córdoba, tomando como referente el Censo Nacional Agropecuario 2018. Los resultados obtenidos mediante la clasificación supervisada de las coberturas en la Pampa Medanosa indicaron que, durante el período analizado, para la totalidad de la región, se perdieron 42.437 ha de montes (Tabla 12) con reducciones situadas principalmente entre 2014/15 y 2016/17. Esto puede observarse en la mencionada Figura 32.

4. Conclusiones

La metodología de aprendizaje automático basada en bosques aleatorios de clasificación, conjuntamente con el número de sitios de entrenamiento alcanzado, permitió obtener clasificaciones supervisadas con un alto nivel de exactitud.

Las clasificaciones obtenidas posibilitaron la visualización de la variación espacial y temporal la frontera agrícola y del desplazamiento de los cultivos agrícolas en la región. El análisis permitió confirmar que este sector de transición semiárido donde antaño se establecía un frente en estado estacionario de la frontera agropecuaria actualmente se encuentra profundamente modificado por el uso agrícola. El incremento de los cultivos de grano anuales estivales en esta región ha ocurrido fundamentalmente sobre superficie de pasturas. El área identificada para la categoría forrajeras exhibió una reducción porcentual del 50% en 2019 relativa a 2007. Si bien se observó que los cultivos dominantes en cuanto superficie fueron soja y maíz, y se mantuvieron a través del tiempo en el período evaluado, la superficie bajo uso agrícola de la región se mostró sujeta a cambios. El seguimiento de las coberturas vegetales mediante técnicas de clasificación no paramétricas permitió, visualizar la alternancia entre soja y maíz y el movimiento del cultivo de maní dentro del área medanosa desde la campaña 2006/07 hasta la campaña 2018/19. La cobertura asignada a la categoría maíz mostró incrementos del 168%, respecto a 2007, mientras que la de soja presentó un aumento del 75% respecto al mismo año -este cultivo inicialmente contó con mayor superficie en 2007-. La mayor variación porcentual fue alcanzada por maní, que para el ciclo 2006/2007 comenzaba a introducirse en la región, exhibiendo 395% más en cuanto a área sembrada en 2017 que diez años atrás. Por otro lado, el análisis realizado fue sensible a la caída en superficie que expresó este cultivo en 2019.

Se logró, además, situar espacialmente montes de especies arbóreas- nativas y no nativas, sin diferenciar entre ellas-. El algoritmo censó una disminución del 34% de esta clase en 2019 relativo a 2007. El análisis no identificó grandes fluctuaciones en cuanto a los pastizales naturales.

Se destaca también que fue posible la detección de depósitos de materiales arenosos sueltos en superficie cuando los focos de erosión activa alcanzaron dimensiones considerables, condicionada por la resolución espacial de las bandas espectrales, abriendo



paso al conocimiento de que es posible hacer un seguimiento de procesos de degradación por erosión eólica, empero que debieran emplearse resoluciones espectrales mayores para detectar los focos con mayor anticipación.

Esta metodología muestra gran potencial de uso tanto como herramienta diagnóstica de cambios de uso del suelo, modificación de ecosistemas y problemáticas de degradación de suelos. A su vez, podría ser de utilidad como herramienta de control a la aplicación de políticas públicas y de ordenamiento territorial.

Referencias Bibliográficas

- Aizen, M. A., L. A. Garibaldi, y M. Dondo. (2009). Expansión de la soja y diversidad de la agricultura argentina.
- Arce, E. C. (2004). *Identificación del uso del suelo con sistemas agrícolas-pecuarios-forestales por medio de imágenes de satélite Landsat y Cbers*. Trabajo de Conclusão do XVII Curso Internacional de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica, orientado pelo Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff., São José dos Campos , SP, Brasil. En <https://docplayer.es/15622097-Identificacion-del-uso-del-suelo-con-sistemas-agricolas-pecuarios-florestales-por-medio-de-imagenes-de-satelite-landsat-y-cbers.html>
- Baumann, M., C. Levers, L. Macchi, H. Bluhm, B. Waske, N. I. Gasparri, & T. Kuemmerle. (2018). Mapping continuous fields of tree and shrub cover across the Gran Chaco using Landsat 8 and Sentinel-1 data. *Remote sensing of environment*, 216, 201-211.
- BCCBA. (2019). Informe de cultivos n° 164 (pp. 11). Córdoba, Argentina: BCCBA.
- Bolsa de Cereales. (2016). Informe de gira agrícola n°87. Departamentos zona IV sur de Córdoba (pp. 6). Buenos Aires, Argentina: Bolsa de Cereales.
- Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine learning*, 24(2), 123-140.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5-32. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Breiman, L. (2003, 2003). *RF/tools: A class of two-eyed algorithms*.
- Cantero, J., C. Núñez, A. Amuchástegui, y J. Mulko. (2013). Cambios en el uso de la tierra y sus efectos sobre la vegetación del sur de la provincia de Córdoba. En G. O., O. Plevich, V. Lallana y M. Pilatti (Eds.), *Bases Conceptuales y Metodológicas para el Ordenamiento Territorial en el Medio Rural* (1 ed., pp. 672). Río Cuarto, Córdoba, Argentina: Libroclie Ediciones.
- Ciampagna, G., A. Del Boca, A. Molina, y F. Tocchetto. (2019). *Análisis de la evolución del área sembrada de Maní en la provincia de Córdoba*. Trabajo presentado en XXXIV Jornada Nacional del Maní., General Cabrera, Córdoba, Argentina. <https://inta.gob.ar/documentos/analisis-de-la-evolucion-del-area-sembrada-de-mani-en-la-provincia-de-cordoba>

- de Prada, J. D., A. Degioanni, H. A. Gil, J. M. Cisneros, A. Cantero Gutiérrez, V. H. Becerra, . . . J. Hernández. (2008). Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el sur de Córdoba, Argentina.
- Degioanni, A., H. Gil, V. Becerra, E. Bonadeo, J. D. De Prada, J. M. Cisneros, . . . J. A. Cantero. (2013). Informe Técnico: Cultivos, Uso y Manejo de los Suelos en el sur de Córdoba. Enseñanzas de la sequía 2011-2012. Servicio de Conservación y Ordenamiento de Tierras (SeCyOT). (pp. 23). Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Dirección de Estimaciones Agrícolas. (2019). Serie completa de cultivos por campaña, provincia y partido/departamento de Argentina. En <https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/estimaciones-agricolas/archivo/95d066e6-8a0f-4a80-b59d-6f28f88eacd5>
- Dussart, E. G., C. C. Chirino, E. A. Morici, y R. H. Peinetti. (2011). Reconstrucción del paisaje del caldenal pampeano en los últimos 250 años. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, 19(1-2), 54-65.
- Efron, B. (1992). Bootstrap methods: another look at the jackknife *Breakthroughs in statistics* (pp. 569-593): Springer.
- Fiant, S., C. Alonso, P. Meriggiola, L. Fuentes, C. Spinazzé, G. Agosto, . . . R. Farías. (2015). *Estimación por teledetección de la superficie sembrada con maní campaña 2014/2015 en Córdoba, La Pampa y San Luis. (Argentina)*. Trabajo presentado en XXX Jornada Nacional de Maní. 17 de setiembre 2015. , General Cabrera, Córdoba. Argentina.
- Garbarino, S. (2008). Los inicios de la explotación y el comercio forestal en el Territorio Nacional de La Pampa. *UNLPam, Santa Rosa*, 205-213.
- Genero, M. I. (2018). Informes Agropecuarios. Superficie sembrada para diferentes cultivos en el Dpto. Gral. Roca: Agencia de Extensión Rural INTA Huinca Renancó. MAGyA de la provincia de Córdoba. MINAGRI de la Nación.
- Gislason, P. O., J. A. Benediktsson, & J. R. Sveinsson. (2006). Random forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27(4), 294-300. doi: doi:10.1016/j.patrec.2005.08.011
- Google Erth Pro. (2018). Digital Globe.

- Goslee, S. C. (2011). Analyzing Remote Sensing Data in R: The landsat Package. *Journal of Statistical Software*, 43(4).
- Graesser, J., & N. Ramankutty. (2017). Detection of cropland field parcels from Landsat imagery. *Remote sensing of environment*, 201, 165-180. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.027>
- Hijmans, R. J. (2019). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package (Version 3.0-7). En <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Janitza, S., & R. Hornung. (2018). On the overestimation of random forest's out-of-bag error. *Plos One*, 13(8), e0201904. doi: 10.1371/journal.pone.0201904
- Kiema, J. B. K. (2002). Texture analysis and data fusion in the extraction of topographic objects from satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 23(4), 767-776.
- Kursa, M. B., & W. R. Rudnicki. (2010). Feature selection with the Boruta package. *Journal of Statistical Software*, 36(11), 1-13.
- Liaw, A., & M. Wiener. (2002). Classification and regression by randomForest. *R news*, 2(3), 18-22.
- Lowe, B., & A. Kulkarni. (2015). Multispectral image analysis using random forest.
- Marini, M. F. (2008). El avance de la frontera agrícola en el área adyacente al sistema Ventania (Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones Geográficas*, 47, 111-121.
- Marini, M. F., M. F. Vergara, y H. Krüger. (2007). Determinación del uso de la tierra en el partido de Guamini (Argentina) mediante un estudio multitemporal con imágenes Landsat. *Revista de Teledetección*, 27, 80-88.
- Masek, J. G., E. F. Vermote, S. N.E., R. Wolfe, F. G. Hall, K. F. Huemmrich, . . . T.-K. Lim. (2006). A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), 68-72.
- Müller, H., P. Rufin, P. Griffiths, A. J. B. Siqueira, y P. Hostert. (2015). Mining dense Landsat time series for separating cropland and pasture in a heterogeneous Brazilian savanna landscape. *Remote Sensing of Environment*, 156, 490-499.
- Nelson, M. (2017). *Evaluating Multitemporal Sentinel-2 Data for Forest Mapping Using Random Forest*. Master, Stockholm University, Stockholm. En <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1138282/FULLTEXT01.pdf>

- Nguyen, H. T. T., T. M. Doan, & V. Radeloff. (2018). Applying random forest classification to map land use/land cover using LANDSAT 8 OLI. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 363-367.
- Ozdarici, O. A., A. Ozlem, & G. Oguz. (2012). Evaluation of random forest method for agricultural crop classification. *European Journal of Remote Sensing*, 45(1), 421-432. doi: 10.5721/EuJRS20124535
- Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 217-222. doi: 10.1080/01431160412331269698
- Pareeth, S., P. Karimi, M. Shafiei, & C. De Fraiture. (2019). Mapping agricultural landuse patterns from time series of Landsat 8 using random forest based hierarchial approach. *Remote Sensing*, 11(5), 601. doi: <https://doi.org/10.3390/rs11050601>
- QGIS Development Team. (2018). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation (*Version 3.4*). En <http://qgis.osgeo.org>
- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. En <https://www.R-project.org/>.
- Rawat, J. S., & M. Kumar. (2015). Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 77-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.02.002>
- Richards, J. A., & J. A. Richards. (1999). *Remote sensing digital image analysis* (Vol. 3): Springer.
- Schneider, C. F. (2005). Análisis de los patrones de deforestación en el Corredor Biogeográfico del Caldén (Córdoba, Argentina) y su relación con la distancia a caminos, mediante un Sistema de Información Geográfica. (Tesis Grado) Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Secretaría de Agroindustria. (2019). Cadena de Maní- Resumen. En http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Cadenas%20de%20Valor%20de%20Alimentos%20y%20Bebidas/informes/Resumen_Cadena_2019%20Mani_MARZO_2019.pdf

- Secretaría de Agroindustria de la Nación. (2019). Agroindustria difundió el informe sobre stock bovino. En Argentina.gob.ar website: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/agroindustria-difundio-el-informe-sobre-stock-bovino>
- SENASA. (2018). El stock ganadero bovino alcanzó los 54,8 millones de animales. *Senasa Comunica*. En *Senansa Comunica* website: <http://www.senasa.gob.ar/senasa-comunica/noticias/el-stock-ganadero-bovino-alcanzo-los-548-millones-de-animales>
- Sierra, E., y S. Pérez. (2006). Tendencias del régimen de precipitación y el manejo sustentable de los agroecosistemas: estudio de un caso en el noroeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de Climatología*, 6.
- SIS-RIAN. (2018). Red de Información Agropecuaria Nacional. Sistema de Información Secundaria (SIS) Retrieved 26/09/2018, 2018, from <http://sis-rian.inta.gob.ar/>
- Tittonel, P. (2004). *El carbono orgánico de los suelos del centro de Argentina. Derivando indicadores de sustentabilidad a partir de su evolución y estado de equilibrio actual*. (Tesis de Magister en Ciencias Agropecuarias), Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba, Argentina
- Vermote, E., C. Justice, M. Claverie, & B. Franch. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. . *Remote Sensing of Environment*.
- Viglizzo, E. F., L. V. Carreño, H. Pereyra, F. Ricard, J. Clatt, y D. Pincén. (2010). Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En E. F. Viglizzo y E. Jobbágy (Eds.), *Expansión Agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental* (pp. 9-16). Buenos Aires, Argentina: INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Viglizzo, E. F., F. C. Frank, L. V. Carreño, E. G. Jobbágy, H. Pereyra, J. Clatt, . . . M. F. Ricard. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global Change Biology*, 17(2), 959-973. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02293.x
- Viglizzo, E. F., Z. E. Roberto, M. C. Filippin, & A. J. Pordomingo. (1995). Climate variability and agroecological change in the Central Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 55(1), 7-16.



- Waske, B., & M. Braun. (2009). Classifier ensembles for land cover mapping using multitemporal SAR imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(5), 450-457. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.01.003>
- Watts, J. D., & R. L. Lawrence. (2008). Merging random forest classification with an object-oriented approach for analysis of agricultural lands. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(Pat B7), 2006-2009.
- White, E. V., & D. P. Roy. (2015). A contemporary decennial examination of changing agricultural field sizes using Landsat time series data. *Geo: geography and environment*, 2(1), 33-54.



CAPÍTULO V

IMPACTO DEL USO Y DEL MANEJO SOBRE INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO EN LA PAMPA MEDANOSA. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL

1. Introducción

La calidad del suelo es un criterio abstracto que ha resultado difícil de definir dado que es influenciada por factores externos, como el uso y las prácticas de manejo del suelo, interacciones ecosistémicas y ambientales (Doran y Parkin, 1994). Larson y Pierce (1991) la han definido como la habilidad de un suelo para funcionar. Según estos autores, la calidad de un suelo representa un compuesto de sus propiedades físicas, químicas y biológicas que proporcionan un medio para el crecimiento de las plantas, regulan el flujo de agua en el medio ambiente, sirviendo además como amortiguador en la formación, atenuación y degradación de compuestos que amenazan el medio ambiente.

Una definición ampliamente adoptada es aquella propuesta por Doran y Parkin (1994), quienes definen a la calidad de un suelo como “*La capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema sosteniendo la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental y promoviendo la salud vegetal y animal*”. Algunos autores optan por emplear el término “salud del suelo”, el que hace referencia al manejo de la componente biológica de la calidad (Doran y Zeiss, 2000). En este estudio, se utiliza el término calidad de suelo, ya que, no se incluyen indicadores directos de la actividad microbiana. Sin embargo, es necesario tener presente que la componente biológica determina en parte las componentes física y química (Doran y Parkin, 1994), y que, por otro lado, los atributos físicos y químicos regulan la actividad biológica (Doran *et al.*, 1996). En esta investigación se emplean indicadores que representan las tres componentes, entendiéndose a la materia orgánica como parte de la componente biológica (Doran y Parkin, 1994), aunque algunos autores sitúan este indicador dentro de la componente química (Lupi y Mórtola, 2017).

Para la evaluación de la calidad de un suelo es necesario establecer condiciones de referencia (Schmidt y Amiotti, 2016) que posibiliten evaluar si el mismo está en una situación de estabilidad, mejora o deterioro (Shukla *et al.*, 2006). Hasta la actualidad, no ha sido posible definir valores estándar de calidad de suelos debido a la heterogeneidad que los mismos presentan (Marelli *et al.*, 2017). La evaluación del comportamiento de indicadores de calidad de suelo frente a diferentes usos es necesaria para conocer el estado actual de los suelos y diagnosticar o prevenir procesos de degradación.

Históricamente, desde la aparición de las primeras explotaciones agropecuarias en el Dpto. Gral. Roca, han predominado los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos. Sin embargo, según los resultados obtenidos en el Capítulo IV, a partir del ciclo 2007/08, los sistemas de producción puramente agrícolas se han establecido en la región de la Pampa Medanosa desplazando a la ganadería e incrementando la presión de uso del recurso suelo. Se requiere, por lo tanto, un diagnóstico de sus posibles impactos, positivos o negativos, sobre la calidad del suelo en este ambiente semiárido. Al mismo tiempo, surge la necesidad de investigar los efectos de la reciente introducción del cultivo de maní en los indicadores de calidad de suelo relacionados con la erosión eólica. La llegada de este cultivo a esta región, no distinguió entre sistemas de producción, fue adoptado tanto por productores de sistemas puramente agrícolas como por productores de sistemas mixtos agrícola-ganaderos. Y, particularmente en Argentina, no hay estudios que incluyan esquemas mixtos con el cultivo de maní. La mayoría de los estudios del impacto de este cultivo en el suelo han sido llevados adelante sobre planteos agrícolas (Uberto *et al.*, 2002; Parra *et al.*, 2011; Allochis y Quintana, 2017; Genero y Colazo, 2019).

El objetivo del presente capítulo fue analizar el impacto de la adopción de diferentes usos y manejos del suelo sobre un set de indicadores representativos de la calidad de los suelos en la Pampa Medanosa, incluyéndose indicadores relacionados con la erosión eólica. La investigación consistió en un análisis comparativo observacional del uso y manejo del suelo más difundido en la región, con condiciones referentes de mínimo y máximo deterioro, siendo estas representadas por ambientes naturales cuasi-prístinos y médanos fijados o parcialmente fijados, respectivamente.

Se propusieron como indicadores a evaluar en primer lugar, y representando la condición biológica, el carbono orgánico, considerado el principal indicador capaz de reflejar la calidad de un suelo, su productividad y, por presentar, además, sensibilidad al cambio de uso y manejo en el corto plazo (Brejda *et al.*, 2000a; Brejda *et al.*, 2000b; Galantini y Rosell, 2006; Noellemeyer *et al.*, 2006; Duval *et al.*, 2013). El carbono orgánico tiene una gran influencia sobre las propiedades físicas en los suelos con bajos contenidos de arcilla y pobre desarrollo de su estructura (Quiroga *et al.*, 2012). De esta relación deviene la importancia de su estudio en la Pampa Medanosa, dada la mayor evolución de los procesos de pedogénesis comparativamente a los alcanzados por los suelos del este de la provincia, pertenecientes a

la Pampa Húmeda, desde donde fueron tomadas las prácticas de uso y manejo hoy en día ampliamente difundidas. Pérdidas en la materia orgánica de los suelos resultan en la alteración de la estructura superficial y en su posterior erosión (Aguilera, 2000; Aoki *et al.*, 2014).

Los índices vinculados al carbono orgánico, son indicadores tempranos de cambios en la calidad de un suelo generados por un sistema de producción. En el presente estudio se incluyó la determinación del índice de estabilidad estructural de Pieri (1989) citado por Pieri (1995), desarrollado en un ambiente semiárido del oeste de África donde la materia orgánica es la mayor responsable de la estructuración y altamente sensible al manejo del suelo en el corto plazo; el índice de reserva de carbono de Blair (Blair *et al.*, 1995) ($CO_{\text{observado}}/CO_{\text{referencia}}$) que refleja las pérdidas de carbono respecto de una situación de referencia; el índice de estratificación de Toledo (Toledo *et al.*, 2013); y el índice de estratificación de Franzluebbers (2002) que relacionan los contenidos de CO de dos capas de suelo superficiales. Los índices basados en el estudio del carbono orgánico son herramientas útiles para evaluar la calidad del suelo en diferentes sistemas de producción o bajo diferentes prácticas de manejo (Blair *et al.*, 2006; Verma y Sharma, 2007).

Por otra parte, respecto a la condición física del suelo, dos propiedades actúan como pilares fundamentales determinantes de su funcionalismo: la textura o composición elemental, y la estructura o forma de agregarse de las partículas elementales. De estas dos dependerán el comportamiento del aire y el agua del suelo, y la calidad del espacio físico brindado al crecimiento de las raíces (Duchaufour, 1975).

La textura se relaciona transversalmente con todas las demás propiedades del suelo y su análisis es en consecuencia sumamente relevante. En general, esta no es una propiedad modificada por el uso y manejo del suelo, sino que depende de procesos pedogenéticos. Sin embargo, la erosión eólica es un caso particular, ya que esta es en sí misma un proceso geológico modelador del relieve, que puede, además, ser acelerada por la acción antrópica. Es decir, que en situaciones en las que el incremento de la erosión eólica sea causado por un uso y manejo no sustentables, cambios texturales pueden acontecer como consecuencia del filtrado de material direccionado por la acción del viento. Ello deviene en alteraciones de la estabilidad estructural y en la pérdida de protección física de la materia orgánica (de Oro *et al.*, 2017). Estas dos variables, estabilidad estructural y contenido de materia orgánica, están

indirectamente relacionadas con la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado por causa del viento, de allí la importancia de su inclusión en el análisis para el ambiente en estudio.

Además de ser una variable relacionada con el principal proceso de degradación regional, una adecuada estabilidad estructural refleja un suelo físicamente fértil, capaz de brindar condiciones óptimas para el crecimiento vegetal (Cosentino y Kraemer Bherens, 2017). Esta variable conjuntamente con fracción erodable (FE) obtenidos por tamizado en seco son propiedades que definen a la erodabilidad del suelo (Skidmore y Layton, 1992). La fracción erodable (FE) es un indicador físico ampliamente utilizado para evaluar la calidad del suelo en la Región Pampeana Semiárida Argentina (Colazo y Buschiazzi, 2010; Druille *et al.*, 2013b; Rojas *et al.*, 2013; Zilio *et al.*, 2016; de Dios Herrero *et al.*, 2017), ya que indica directamente la susceptibilidad a la erosión eólica (Rostagno *et al.*, 2004). Esta variable, ha sido empleado para evaluar los efectos de la introducción del cultivo de maní en sistemas agrícolas en la provincia de La Pampa (Allochis y Quintana, 2017).

La FE es una variable imprescindible para el cálculo de la pérdida potencial de suelo ya que es el indicador mediante el cual se estima el factor “I”, índice de erodabilidad del suelo, componente de la Ecuación de la Erosión Eólica (WEQ-Wind Erosion Equation) (Woodruff y Siddoway, 1965). Existe actualmente una versión adaptada a la Región Pampeana Semiárida por Panebianco y Buschiazzi (2008) en español (EWEQ).

La composición textural y la materia orgánica determinan la capacidad de intercambio catiónica (CIC) (Porta Casanellas *et al.*, 1999). El uso del suelo podría afectar las dos variables, principalmente la materia orgánica, y en consecuencia podría tener implicancias sobre la CIC, por lo tanto, el análisis de esta variable química fue incluido en el estudio.

A su vez, la CIC define la concentración potencial de cationes en el complejo de cambio, entre ellos existen macronutrientes esenciales requeridos por los cultivos- Ca, Mg, K-. Efectos del uso sobre esta variable podrían llegar a observarse sobre las bases del complejo. Esto podría verse reflejado en el pH, una de las propiedades más descriptivas de la calidad edáfica, dado que la composición de protones de la solución está determinada principalmente por los iones intercambiables (Álvarez y Rubio, 2012). Al removerse las bases, los protones de diversos orígenes en el suelo - hidrólisis del CO₂ proveniente de la actividad biológica, de los ácidos de la materia orgánica, de los grupos oxidrilos de las láminas de aluminosilicatos, y de los fertilizantes, ocupan los sitios de intercambio aumentando la acidez (Vázquez y

Millán, 2017). De allí la necesidad de incluir en este estudio el análisis de la CIC, las bases del complejo de cambio y el pH. Pezzini *et al.* (2010) han reportado un importante grado de acidificación y reducción de bases de intercambio, particularmente baja saturación con Ca, en suelos regionales. Estos autores han encontrado una mayor respuesta al encalado en suelos de baja capacidad buffer próximos a la localidad de Washington (Córdoba).

Finalmente se propuso explorar el contenido de fósforo extractable (P) actual en la región, ya que es un macronutriente fundamental para el desarrollo vegetal, segundo nutriente limitante en la producción agrícola nacional y que presenta una gran interacción con la matriz del suelo (Rubio y Álvarez, 2012). Pérdidas de este nutriente en sedimentos eólicos han sido reportadas por Iturri *et al.* (2016). Bongiovanni *et al.* (2010) estudiaron los niveles de P en el departamento General Roca (Córdoba) hallando niveles medios superiores a los umbrales críticos para el cultivo de maíz. Estos autores señalan que de continuar con planteos de intenso uso agrícola los niveles de P pueden disminuir significativamente en estos suelos, dado el predominio de texturas gruesas y baja capacidad buffer.

2. Materiales y métodos

2.1. Métodos de determinación de los indicadores

El contenido de carbono orgánico total (CO) fue determinado por el método de Walkley y Black (Nelson y Sommers, 1982). Se calculó luego el CO relativo, teniendo como valor de referencia el CO de la situación de mínimo deterioro.

Se calcularon los siguientes índices:

1. Índice de estabilidad estructural de Pieri (Pieri, 1989)

Ec. 1.

$$St\% = \left[\frac{MO}{A + L} \right] * 100$$

Donde:

MO: Porcentaje de materia orgánica

A+L: Porcentaje de las fracción arcilla más la fracción limo.

2. Índice de reserva de carbono de Balir, IRC (Blair et al., 1995)

Ec. 2.

$$IRC = \frac{CO \text{ observado}}{CO \text{ referencia}}$$

Donde:

CO observado: Carbono orgánico en una situación intervenida por el ser humano.

CO referencia: Carbono orgánico en una situación prístina.

3. Índice de estratificación de Toledo (Toledo et al., 2013)

Ec. 3.

$$IE \text{ de Toledo} = \frac{CO_{0-10 \text{ cm}}}{CO_{10-20 \text{ cm}}}$$

Donde

CO: Carboo orgánico

4. Índice de estratificación de Franzluebbers (Franzluebbers, 2002)

Ec.4

$$IE \text{ Franzluebbers} = \frac{CO_{0-5 \text{ cm}}}{CO_{12,5\text{cm}-20\text{cm}}}$$

Ec. 5. Adaptación de la Ec.4

$$IE \text{ adaptado de Franzluebbers} = \frac{CO_{0-5\text{cm}}}{CO_{10-20\text{cm}}}$$

La textura, fue determinada por el método del hidrómetro de Day (1965).

Para la obtención de la estabilidad estructural en seco (EES) se empleó el método del tamiz rotativo (Chepil, 1962)²², aceptado como la técnica estándar para determinar la estabilidad estructural, la fracción erodable y la distribución de tamaño de los agregados en ambientes áridos y secos, y para la evaluación de erosión eólica (Skidmore *et al.*, 1994). Para llevar adelante esta determinación se tomaron muestras sin disturbar en bandejas de la porción superior del horizonte superficial, de 0-5 cm, dado que en este punto recae el interés de este análisis, siendo esta capa superficial de suelo aquella potencialmente afectable por la erosión eólica. Las muestras fueron secadas al aire y tamizadas en dos veces mediante el tamiz rotativo. En el primer pasaje la muestra fue tamizada y segregada por agregados de diámetro menor a 0,42 mm, entre 0,42 y 0,84 mm, entre 0,84 y 2 mm, entre 2 y 6,4 mm, entre 6,4 y 19,2 mm y mayores a 19,2 mm. Cada una de estos grupos de agregados fue tamizado nuevamente para analizar su estabilidad a la degradación. Los resultados fueron incluidos en la siguiente ecuación:

Ec. 6

$$EES (\%) = 1 - \frac{W_2 < 0,84 \text{ mm}}{W_1 > 0,84\text{mm}}$$

²² Video del tamiz rotativo en funcionamiento durante el procesamiento de muestras en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa: [Tamiz Rotativo \(Chepil, 1962\)](#).

Donde:

W_1 : es el peso (g) de los agregados retenidos sobre el tamiz de 0,84 mm luego del primer tamizado.

W_2 : es el peso (g) de los agregados que pasaron a través del tamiz de 0,84 mm después de un segundo tamizado.

Mediante el empleo del mismo tamiz, se obtuvo la fracción erodable (FE). Dada la dificultad que presenta su determinación, por ser un método que requiere un equipamiento específico y no ampliamente difundido, la misma variable se determinó además por el método de tamizado manual sugerido por el manual de USDA-NRCS (2002) y se estimó mediante la ecuación propuesta por López *et al.* (2007); con la finalidad de establecer una comparación entre los resultados de los tres métodos.

El pH actual fue determinado por el método potenciométrico en una relación suelo: agua 1:2,5.

Se determinó la CIC y la concentración de los cationes del complejo de cambio mediante extracción con acetato de amonio a pH 7, la cuantificación de los cationes Ca y Mg se realizó mediante titulación con EDTA, mientras que la concentración de Na y K se realizó por fotometría de llama (SAMPLA, 2004).

Finalmente, se obtuvo el contenido de fósforo extractable (P) por el método de Bray–Kurtz 1 (Bray y Kurtz, 1945).

2.2. Descripción de las situaciones de uso y manejo del suelo evaluadas

Se seleccionaron sitios de muestreo representativos de la variabilidad de la presión de uso de los suelos en la Pampa Medanos. Las situaciones de uso y manejo observadas mantuvieron durante las campañas 2006/07 a 2016/17 las siguientes características:

- **A1:** Agrícola con cultivo de maní.
- **A2:** Agrícola sin cultivo de maní.
- **Mx1:** Mixto con cultivo de maní.
- **Mx2:** Mixto sin cultivo de maní.

Las rotaciones agrícolas con cultivos de maní –**A1**-, presentaron una frecuencia de este cultivo una vez cada cuatro años. Combinándose con maíz y soja principalmente.

En las rotaciones agrícolas sin maní –**A2**-, predominó la proporción soja/maíz 2:1.

En cuanto a los sistemas mixtos relevados –**Mx1** y **Mx2**-, presentaron un período de uso agrícola con iguales manejos que los descriptos anteriormente, empero, alternado con un período de, en su mayoría, cuatro años de pasturas perennes. En general de alfalfa, que, en su primer año, se implantó consociada con una o más gramíneas.

La situación natural –**N**-, fue representada por suelos bajo vegetación espontánea con mínima intervención, muy baja presión de pastoreo extensivo y de tipo ocasional. Se tomaron las muestras seleccionando los sitios menos perturbados por el ganado, libres de bioturbación.

Se seleccionaron los sitios de muestreo correspondientes a Haplustoles típicos, Haplustoles énticos y Ustipsamments típicos. Se trabajó con muestras pertenecientes a las Series Huinca Renancó, Ea. Las Mercedes, Buena Esperanza, Italó, Villa Huidobro, El Yará y El Veintitrés. La distribución de las muestras en los tres tipos de suelos se ve en la Figura 33.

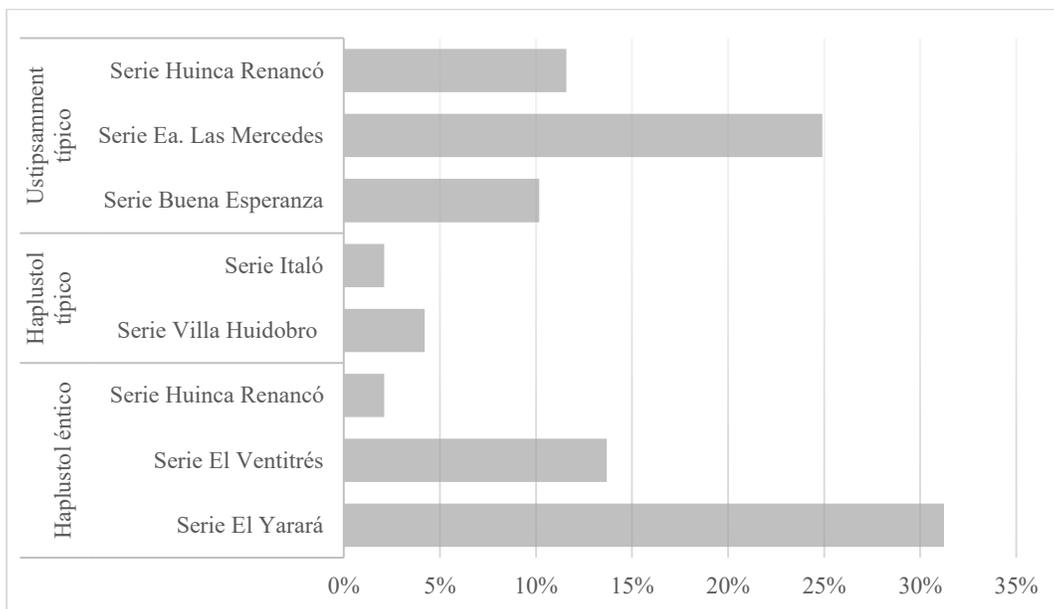


Figura 33. Suelos y series predominantes de la Pampa Medanosa de las que fueron extraídas las muestras.

Los números de sitios bajo cada condición de estudio están explícitos en la Tabla 13, en cada uno de ellos se tomaron tres muestras (0-5 cm, 5-10 cm y 10-20 cm), y su localización puede apreciarse en la Figura 34.

Tabla 13. Número de muestras tomadas bajo cada condición de estudio.

<i>Situaciones de Uso y Manejo</i>	<i>Sitios</i>
<i>Agrícola con maní</i>	85
<i>Agrícola sin maní</i>	70
<i>Mixto con maní</i>	28
<i>Mixto sin maní</i>	32
<i>Situaciones de referencia</i>	
<i>Naturales</i>	35
<i>Médanos</i>	33
<i>Total de sitios muestreados</i>	283

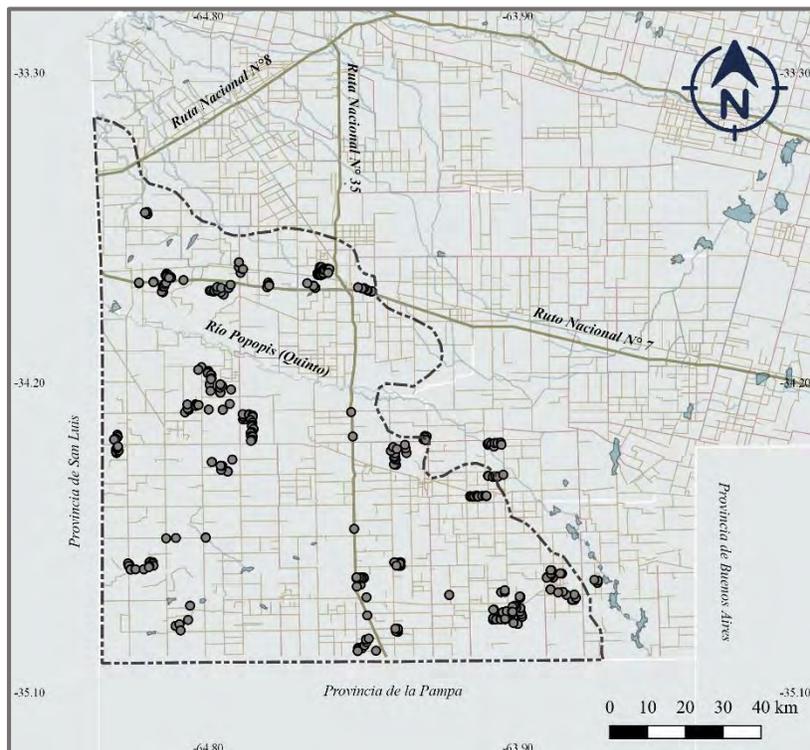


Figura 34. Sitios de muestreo georreferenciados en la Pampa Medanosa.

2.3. Análisis estadísticos

El objetivo de este capítulo fue evaluar el efecto del uso y manejo del suelo sobre un set de indicadores de calidad de suelo mediante un estudio por observación comparativo. Por lo tanto, para lograr observar la variabilidad en la calidad explicada puntualmente por el efecto del uso y del manejo del suelo, se compararon muestras de igual textura.

2.3.1. Carbono orgánico total (CO)

Se determinó la normalidad de la distribución de los datos colectados a través del test de Shapiro-Wilks y del gráfico de probabilidad normal Q-Q plot. La homocedasticidad de las varianzas fue determinada a través del test de Levene. Estos test fueron empleados para evaluar normalidad y heterocedasticidad en el análisis de todos los indicadores. Para aumentar la normalidad la escala de los datos fue transformada mediante la función raíz cuadrada ($y=\sqrt{x}$). En vista de que las varianzas fueron heterocedásticas, para el análisis de

los efectos del uso y el manejo del suelo sobre el CO, se emplearon modelos lineales generales y mixtos (Pinheiro y Bates, 2004). No se encontró interacción entre los efectos del uso y la profundidad, por lo tanto, el análisis se efectuó particionado por profundidad. El modelo empleado se seleccionó con los criterios de Akaike (1973) y Bayesiano de Schwarz (BIC) (Schwarz, 1978).

Los efectos fijos estuvieron representados por las situaciones de uso y manejo del suelo, mientras que los efectos aleatorios por las condiciones de uso y manejo anidadas en la variable categórica textura.

La comparación de medias estadísticamente diferentes fue realizada mediante la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

Finalmente se evaluó la variación de las demás propiedades del suelo en función del CO mediante la obtención de los coeficientes de correlación de Pearson y análisis de regresión lineales y no lineales.

2.3.2. Estabilidad estructural en seco (EES) y distribución de los agregados

Para evaluar la estabilidad estructural en seco se empleó un análisis de la varianza, mientras que para analizar la distribución de los agregados y los efectos del uso del suelo sobre estos se empleó un análisis de la covarianza en el que las covariables fueron arcilla más limo y materia orgánica.

La comparación de medias estadísticamente diferentes fue realizada mediante la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

2.3.3. Fracción erodable (FE)

Para el estudio de los efectos del uso y manejo de suelo sobre esta variable, los datos fueron transformados mediante la obtención de su raíz cuadrada ($y=\sqrt{x}$) en vista de que su distribución, analizada mediante un test de Shapiro-Wilks, no fue normal. Existen antecedentes de transformaciones de escala para aumentar la normalidad de esta variable, Druille *et al.* (2013a) han aplicado transformaciones del tipo $y=\arccoseno \sqrt{x}$. Las varianzas fueron homocedásticas y los errores independientes, por lo tanto, se procedió a realizar un análisis de la varianza, con modelos lineales mixtos (Pinheiro y Bates, 2004) con efectos fijos

del uso y manejo y efectos aleatorios de las condiciones estudiadas anidadas en la textura. El modelo empleado se seleccionó con los criterios de Akaike (1973) (Akaike, 1973) y Bayesiano de Schwarz (BIC) (Schwarz, 1978) y se realizó un test de comparación de medias estadísticamente diferentes mediante la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

Se evaluó la variación de las demás propiedades del suelo en función de la fracción erodable mediante la obtención de los coeficientes de correlación de Pearson y regresiones lineales. Particularmente, el comportamiento de la FE frente al CO se estudió mediante un análisis de regresión no lineal.

Por otra parte, se realizó la comparación de la FE obtenida por tamizado con aquella estimada mediante la ecuación propuesta López *et al.* (2007), utilizada en la Ecuación de la Erosión Eólica (EWEQ) adaptada para la Región Pampeana Semiárida Argentina (RPSA) por Panebianco y Buschiazzi (2008):

Ec. 7

$$FE \% = 9,98 + 6,91 * \frac{Arena(\%)}{Arcilla(\%)} + \frac{14,1}{Materia\ Orgánica(\%)}$$

Para ello se realizó un test de bondad de ajuste para comparar la FE obtenida en laboratorio mediante tamizado y fracción erodable estimada ($F\hat{E}$) y se obtuvo el R^2 de ajuste del modelo matemático (Martínez Rodríguez, 2005).

2.3.4. pH:

El pH presentó una distribución normal y varianzas homogéneas. Se realizó un análisis de la varianza con modelos lineales mixtos (Pinheiro y Bates, 2004), con efectos fijos del uso y manejo, y efectos aleatorios del uso anidados en la textura.

La comparación de medias estadísticamente diferentes fue realizada mediante la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

2.3.5. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Para la evaluación de la CIC se realizó un análisis de la varianza con modelos lineales mixtos (Pinheiro y Bates, 2004), con efectos fijos del uso y manejo, y efectos aleatorios del uso anidados en la textura.

La comparación de medias estadísticamente diferentes fue realizada mediante la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

2.3.6. Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K)

Para la evaluación de las bases se realizó un análisis de la varianza con modelos lineales mixtos (Pinheiro y Bates, 2004), con efectos fijos del uso y manejo, y efectos aleatorios del uso anidados en la textura.

La comparación de medias estadísticamente diferentes fue realizada mediante la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

2.3.7. Fósforo extractable (P)

EL P extractable no presentó distribución normal, por lo que los datos debieron ser transformados mediante la función raíz cuadrada ($y=\sqrt{x}$). Se efectuó un análisis de la varianza utilizando modelos lineales mixtos, con efectos fijos de las situaciones de uso y manejo del suelo, homocedástico; con efectos aleatorios del uso anidado en la textura.

La comparación de medias estadísticamente diferentes, fue realizada mediante la prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia $\alpha=0,05$.

Todos los análisis fueron realizados con los softwares estadísticos InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2017) y R (R Core Team, 2019).

3. Resultados y Discusión

3.1. Distribución textural de los suelos estudiados en la Pampa Medanosa

Las texturas predominantes encontradas en la Pampa Medanosa han sido gruesas fueron franco arenoso y arena franca, con altos porcentajes de arena. El 58% de las muestras presentó textura franco arenosa, el 27% arena franca, el 8% franca, el 5% arenosa, y un 2% otras texturas (Figura 35).

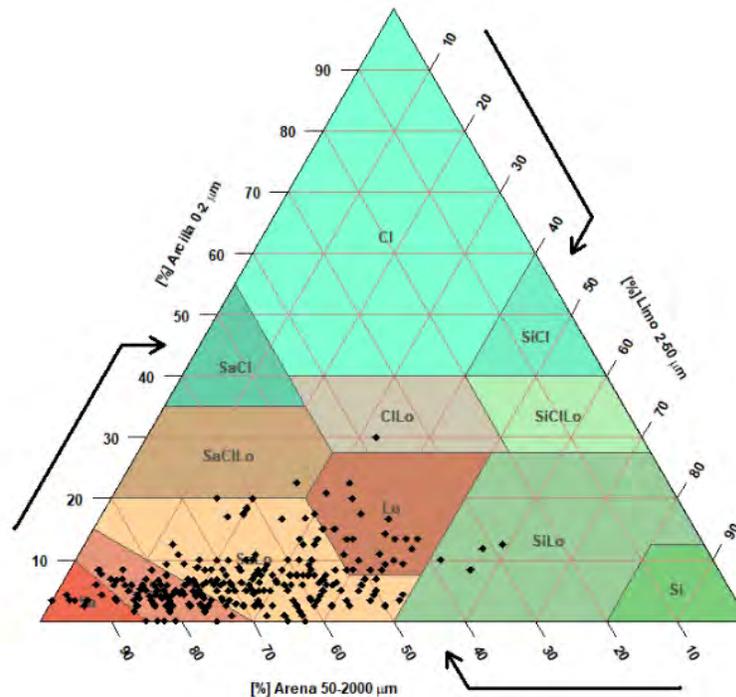


Figura 35. Texturas de suelo encontradas en la Pampa Medanosa. 1 -Cl: *clay* arcilloso; 2 -SiCl: *silty clay* arcillo limoso; 3 -SaCl *sandy clay* arcillo arenoso; 4 -ClLo *clay loam* franco arcilloso; 5 -SiClLo *silty clay loam* franco arcillo limoso; 6 -SaClLo *sandy clay loam* franco arcillo arenoso; 7 -Lo *loam* franco; 8 -SiLo *silty loam* franco limoso; 9- SaLo *sandy loam* franco arenoso; 10 -Si *silt* limoso; 11 -LoSa *loamy sand* areno franco; 12 -Sa *sand* arenoso.

3.2. Estado actual e impactos de diferentes usos y manejos del suelo sobre el carbono orgánico del suelo en la Pampa Medanosa

El efecto del uso y del manejo del suelo sobre el contenido de carbono orgánico (CO) resultó altamente significativo (P-valor <0,0001). Se destaca que, aún ante altos valores coeficientes de variación, se tuvo evidencia estadísticamente significativa para diferenciar la acción de la presión ejercida sobre el CO por cada una de las situaciones de uso y manejo estudiadas (Tabla 14).

Tabla 14. Valores medios, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación (C.V.%) del contenido de Carbono Orgánico (CO) (g.kg⁻¹) para diferentes situaciones de uso y manejo del suelo estudiadas en la Pampa Medanosa.

Situaciones	Prof.	n	CO	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.	
Natural	0-5 cm	35	24,86	9,27	37,27	4,19	57,29	A
Mixto sin maní	0-5 cm	32	15,58	4,86	31,18	9,72	26,96	B
Mixto con maní	0-5 cm	28	13,93	2,91	20,91	6,22	18,16	B
Agrícola sin maní	0-5 cm	70	12,59	4,15	33,00	4,76	21,16	C
Agrícola con maní	0-5 cm	85	11,16	3,48	31,14	1,11	19,04	D
Médano	0-5 cm	33	9,32	3,41	36,64	3,11	19,43	E
Natural	5-10 cm	35	14	6,15	43,91	3,46	28,23	A
Mixto sin maní	5-10 cm	32	8,93	3,24	36,34	4,16	20,98	B
Mixto con maní	5-10 cm	28	8,26	2,65	32,09	4,23	16,27	BC
Agrícola con maní	5-10 cm	70	7,57	2,15	28,40	3,11	12,29	BC
Agrícola sin maní	5-10 cm	85	7,98	2,56	32,08	2,52	17,27	C
Médano	5-10 cm	33	6,27	3,78	60,36	1,39	20,12	D
Natural	10-20 cm	35	8,19	4,79	58,5	0,39	25,31	A
Mixto sin maní	10-20 cm	32	6,24	2,82	45,13	2,88	15,62	A
Mixto con maní	10-20 cm	28	5,57	1,49	26,74	3,20	9,33	B
Agrícola sin maní	10-20 cm	70	5,3	1,81	34,12	2,50	10,00	B
Agrícola con maní	10-20 cm	85	5,19	1,42	27,26	1,57	9,72	B
Médano	10-20 cm	33	3,3	1,32	39,89	0,80	5,70	C

Medias con una letra en común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

La situación de uso y manejo agrícola con cultivo de maní (A1) presentó el menor valor promedio de CO_{0-5cm}, próximo al 45% de CO relativo al valor medio hallado bajo la condición de mínimo disturbio. Este hecho sugiere que el efecto de la introducción del cultivo de maní, acompañado de las secuencias de cultivos actualmente predominantes, se percibe únicamente en los sistemas agrícolas en los primeros 5 cm del suelo. Comportamiento que

podría explicarse, en parte, por el disturbio ocasionado en la capa superficial durante las operaciones de arrancado que promueven mejores condiciones para la mineralización del material orgánico mediante incrementos de la oxigenación. Uberto *et al.* (2002) han señalado que la presencia de maní en rotaciones agrícolas disminuye la materia orgánica del suelo y el rastrojo en superficie, no solo por el escaso aporte de biomasa, sino, además, por las operaciones de cosecha propias de este cultivo. Las mismas, propiciarían los procesos de mineralización más que los de humificación.

Por otra parte, los sistemas mixtos fueron superiores en contenido de CO a los dos manejos agrícolas estudiados. El sistema Mx2 presentó un 63% del CO_{referencia}, mientras que Mx1 un 56% del CO_{referencia}. A2 mostró de 0-5 cm el 51% del CO relativo a la condición cuasi prístina.

Para las capas de 5-10 cm y 10-20 cm, los sistemas mixtos con maní (Mx1) no fueron diferentes del planteo agrícola sin maní (A2), posicionándose en una instancia intermedia entre Mx2 y A2. Esta situación podría indicar que el manejo durante los ciclos agrícolas de estos sistemas mixtos ejerce una presión tal sobre el recurso suelo que lleva a la pérdida de CO en la misma medida que si el sistema hubiese sido solo agrícola, aunque sin llegar al nivel de reducción mostrada por A1. Otra de las posibles causales de esta igualdad en el nivel de CO encontrada entre Mx1 y A2 podría ser que el tiempo bajo pasturas luego del período agrícola no estaría siendo el suficiente para mantener o incrementar la fracción orgánica y por tal motivo no llegó a comportarse como Mx2 y expresó una mayor pérdida de CO. Todo ello sugiere la necesidad de revisión de la planificación de las rotaciones, no solo en los sistemas agrícolas sino además en los sistemas mixtos.

Varios autores han demostrado que la adecuada planificación de las rotaciones es una herramienta para propiciar el incremento del CO en los suelos bajo sistemas de producción agropecuarios. Krüger *et al.* (2004) citados por Galantini y Suñer (2008), han observado en un ensayo de larga duración en Guaminí -oeste de la provincia de Buenos Aires- que una rotación compuesta por una pastura de cinco años de duración y cinco años de agricultura, en el largo plazo (30 años), posibilitó el aumento de la MO total en 0,35 Mg. ha⁻¹ por cada año de pastura. Apoyando estos resultados, Bayer *et al.* (2006) han señalado que el grado de reducción del carbono orgánico del suelo depende del manejo y de la secuencia de cultivos.

Por otro lado, Studdert y Echeverría (1998), han mencionado que es posible manejar el CO del suelo a través de la planificación de las rotaciones, inclusive ante laboreos convencionales. Studdert y Echeverría (2002) señalan el mantenimiento del CO durante el período de pastura en sistemas de producción mixtos seguidos por una reducción del CO durante el período agrícola.

Sainz Rozas *et al.* (2014) realizaron un estudio que comprendió completamente la Región Pampeana, en él hallaron que los valores más bajos de materia orgánica se encontraron al O de Buenos Aires, E de la Pampa y SO de Córdoba. A nivel regional, los autores mencionan que la agricultura redujo en promedio el 24% de la MO respecto de los suelos prístinos, pero en algunas zonas la disminución fue del 30 al 50%.

Los valores de CO de la capa superficial del suelo han sido próximos a la mitad de los tenores de referencia inclusive en los sistemas mixtos, lo que puede observarse en la Tabla 15 a través del índice de reserva de carbono de Blair. Mayores valores de IRC indican suelos mejor provistos de CO.

Los valores de CO presentados por las situaciones de referencia han sido en promedio 24,9 g. kg⁻¹ CO de 0-5 cm, 14 g. kg⁻¹ CO de 5-10 cm, 8,2 g. kg⁻¹ CO de 10-20 cm. Esto marca una fuerte estratificación del CO en las situaciones naturales, la que también se observó en los suelos de las producciones agropecuarias. Es importante mencionar que la gran mayoría de los estudios de calidad de suelos son realizados tomando muestras de 0-20 cm, son escasas las investigaciones que fraccionan el muestreo de la porción superficial del suelo. En el estudio particular del CO es más frecuente el muestreo estratificado. Larroulet *et al.* (2016) y Hepper *et al.* (2018) tomaron muestras de los 2, 5 cm superiores del suelo y reportaron valores de 20,88 gr. kg⁻¹ CO bajo monte nativo de Caldén en la provincia de La Pampa. Por otro lado, Colazo y Buschiazzo (2010) hallaron valores de CO de 18 g.kg⁻¹ CO en suelos vírgenes bajo vegetación nativa de la provincia de La Pampa hasta la profundidad de 2,5 cm en suelos areno francos y alrededor de 50 g.kg⁻¹ en muestras de suelos franco arenosos.

Tabla 15. Índice de reserva de carbono de Blair *et al.* (1995) y valores promedio del contenido de carbono orgánico del suelo (g. kg⁻¹) en situaciones de uso y manejo con y sin cultivo de maní en la Pampa Medanosa.

Profundidad	Situación de uso y manejo	CO promedio (g.kg ⁻¹)	IRC (Blair <i>et al.</i> , 1995)
0-5cm	Mixto sin maní	15,58	0,63
	Mixto con maní	13,93	0,57
	Agrícola sin maní	12,59	0,51
	Agrícola con maní	11,16	0,45
Situación de referencia			
	Natural	24,86	
Profundidad	Situación de uso y manejo	CO promedio (g.kg ⁻¹)	IRC (Blair <i>et al.</i> , 1995)
5-10cm	Mixto sin maní	8,93	0,64
	Mixto con maní	8,26	0,60
	Agrícola con maní	7,57	0,58
	Agrícola sin maní	7,98	0,55
Situación de referencia			
	Natural	14	
Profundidad	Situación de uso y manejo	CO promedio (g.kg ⁻¹)	IRC (Blair <i>et al.</i> , 1995)
10-20cm	Mixto sin maní	6,24	0,77
	Mixto con maní	5,57	0,69
	Agrícola sin maní	5,3	0,65
	Agrícola con maní	5,19	0,64
Situación de referencia			
	Natural	8,19	

Los sistemas agrícolas presentaron el menor índice de reserva de carbono de Blair-IRC- indicando que, en estos suelos y bajo las rotaciones predominantes incluidas en el análisis, la mineralización ha sido superior a la humificación en ambos sistemas de producción. Al incrementarse la profundidad, el IRC encontrado fue mayor, esto sugiere que el efecto de las prácticas de uso y manejo incluidas en este estudio se percibe principalmente en los primeros 5 cm del suelo. Si bien la reducción del CO ha sido un 18% mayor en A1 que en Mx2, en general, todas las condiciones antropizadas han presentado tenores de CO cercanos a la mitad de aquel encontrado en suelos cuasi prístinos, coincidiendo con las pérdidas del 40-50% reportadas por Duval *et al.* (2016b) en suelos con agricultura bajo siembra directa en la pampa húmeda y sub húmeda. Por otro lado, Bravo (2013) señaló que suelos de uso agrícola

presentan solo el 60% del CO de suelos con uso forestal en el suroeste de Buenos Aires. Este autor, mencionó también, que los sistemas agrícola-ganaderos concentraron más CO que aquellos puramente agrícolas sobre suelos cuyo material parental fueron sedimentos loésicos; sin diferencias estadísticas. En los suelos de la Pampa Medanos, probablemente, los impactos del uso y manejo hayan sido más evidentes por su menor resistencia, dado que han sido desarrollados sobre sedimentos eólicos más gruesos. Esto es importante, además, porque según Hevia *et al.* (2003) la relación entre las fracciones orgánicas y la textura determina los efectos de erosión eólica sobre las mismas fracciones orgánicas.

En general, el CO se observó estratificado, con una mayor concentración en la capa superficial del suelo (0-5 cm), disminuyendo con la profundidad y presentando una distribución diferencial. Resultados similares fueron reportados por (Duval *et al.*, 2016a). Esta tendencia se mantuvo en todas las situaciones observadas, aunque cabe destacar que en las situaciones cuasi prístinas el contraste en cuanto al CO de la capa superficial y las subyacentes fue mayor.

Al compararse los índices de estratificación de Toledo *et al.* (2013) y la adaptación realizada del índice de estratificación de Franzluebbbers (2002), pudo observarse que el CO se localiza principalmente en los primeros 10 cm del suelo (Tablas 16 y 17). Los valores encontrados reflejaron la pérdida de materia orgánica de la capa superficial del suelo, ya que, para ambos índices, el valor hallado para la situación referente del mínimo deterioro -N- fue mayor al encontrado en las situaciones de uso antrópico. El contenido de CO de los primeros 5 cm estuvo en el orden del 70-80% de aquel que exhibió la capa de 10-20cm aun siendo esta última el doble de su espesor. Y, se observó, además, que el contenido de los primeros 10 cm duplicó el de los 10 cm subyacentes.

Sainz Rozas *et al.* (2014) señala que la gran magnitud de la caída de MO en el norte de Buenos Aires, Sur de Santa Fe y sudeste de Córdoba se podrían asociar a la prolongada historia agrícola de los suelos de esta área y a la elevada frecuencia de la soja en la rotación.

Para el índice de Franzluebbbers, en situaciones en siembra directa, han sido reportados valores que oscilan entre 2 y 4, mientras que para labranza convencional se los valores han sido inferiores a 2 (Franzluebbbers, 2002). Estos datos han sido reportados en suelos de

texturas más finas (franco limosos y franco arcillo limosos) en EE.UU., bajo rotaciones con alta proporción de gramíneas estivales y con inclusión de cultivos de cobertura.

Además de los efectos propios de las diferencias texturales, en los sistemas de producción agrícolas analizados en la Pampa Medanosa en siembra directa están bajo secuencias de cultivos en los que los aportes de restos vegetales son inferiores y con mayor proporción de leguminosas anuales de baja relación C/N, poniendo en duda la sustentabilidad del manejo actual en este ambiente semiárido, tanto en los sistemas mixtos como en los agrícolas.

Sin embargo, se debe tener en cuenta también, que valores de 4 mencionados para este índice por los autores, no han sido alcanzados tampoco en la situación de mínimo disturbio. Por lo tanto, si bien el índice de Franzluebbbers sugiere la idea de que los aportes orgánicos de las rotaciones bajo siembra directa en la Pampa Medanosa son muy bajos y fácilmente descomponibles en comparación a los de EE.UU., no es posible tomar esos datos como valores umbrales, porque, probablemente, valores de 4 no sean alcanzables en la región.

Tabla 16. Índice de estratificación de carbono propuesto por Toledo *et al.* (2013) IE= [CO_{0-10cm}/CO_{10-20cm}].

Situaciones de uso y manejo	IE Toledo <i>et al.</i> (2013)
Mixto sin maní	1,96
Mixto con maní	1,99
Agrícola sin maní	1,90
Agrícola con maní	1,84
Situación de referencia	
Natural	2,37

Tabla 17. Índice de estratificación de carbono adaptado de Franzluebbbers *et al.* (2002) IE= [CO_{0-5cm}/CO_{10-20cm}].

Situaciones de uso y manejo	IE Adaptado de Franzluebbbers <i>et al.</i> (2002)
Mixto sin maní	2,5
Mixto con maní	2,5
Agrícola sin maní	2,4
Agrícola con maní	2,2
Situación de referencia	
Natural	3,0

Las fracciones más finas del suelo que propician una mejor estructuración, ejercen acciones de protección física sobre la materia orgánica (Van Veen y Kuikman, 1990). A su vez, esta última tiene una influencia directa sobre la estabilidad de la estructura, constituyéndose un bucle de retroalimentación negativa que tiende al equilibrio y al correcto funcionalismo del sistema suelo que denota la relevancia del componente orgánico en el suelo. Según Bravo (2013) la granulometría de los materiales parentales define el umbral de almacenamiento máximo de carbono orgánico en los suelos, el autor, halló en suroeste de Buenos Aires que al incrementarse la intensidad de uso del suelo los niveles de equilibrio del CO se reducen, presentando mayor resistencia los suelos con mayor proporción de A+L.

En los ambientes arenosos de la Pampa Medanos los factores de formación dieron origen a suelos poco desarrollados sobre sedimentos eólicos de texturas gruesas, con elevadas tasas de mineralización del material orgánico y pobre estructuración en todo el perfil. Esto sugiere que las tendencias encontradas referidas a pérdidas del componente orgánico del suelo en las condiciones de uso y manejo evaluadas podrían tener efectos directos sobre la susceptibilidad a la degradación física de la estructura de la capa superficial y consecuentemente sobre la susceptibilidad a la erosión eólica. López Fourcade *et al.* (2008) han encontrado un menor índice de estabilidad de agregados en suelos de la Pampa Medanos cuando los contenidos de materia orgánica de estos suelos fueron menores.

El índice de estabilidad estructural de Pieri (St%) ha sido utilizado como indicador de calidad de suelo en la Región Pampeana Argentina (Duval *et al.*, 2015; Fernández *et al.*, 2016; Zilio *et al.*, 2016). Pieri (1995) señala la importancia del empleo de indicadores que incluyan la materia orgánica dada su sensibilidad en el corto plazo a la modificación de la secuencia de cultivos. El índice propuesto por el autor, consta de cuatro categorías frente a la degradación física: St% inferior a 5 refiere a un suelo de precipitaciones radado, entre valores de 5 y 7 refiere a un suelo con alto riesgo de degradación física, entre 7 y 9 corresponde a suelos que presentan moderado riesgo a la degradación física y, finalmente, cuando es superior a 9 se tienen suelos estables (Pieri, 1989) citado por (Pieri, 1995).

Los porcentajes de sitios dentro de cada categoría del St% pueden observarse en la Tabla 18. Del total de muestras de los sistemas agropecuarios solo el 23% fueron estructuralmente

estables, el 20% presentó moderado riesgo a la degradación física, y el 57% exhibió alto riesgo de degradación física o un estado degradado.

Respecto al manejo de los sistemas, de aquellos agrícolas con cultivo de maní el 34% está estructuralmente degradado, mientras que, de aquellos agrícolas sin maní, el 20% presenta esas condiciones. De los sistemas mixtos con maní solo el 18% correspondió a la categoría degradados, y de los mixtos sin maní, el 26%.

Tabla 18. Porcentaje de situaciones de uso agrícolas y mixtas con y sin cultivo de maní en la Pampa Medanosa dentro de las categorías de riesgo a la degradación física determinadas mediante el St (%) de Pieri (1989).

Categoría	Agrícola con maní	Agrícola sin maní	Mixto con maní	Mixto sin maní
Estable	27%	22%	32%	14%
Moderado	13%	25%	12%	29%
Alto	27%	33%	13%	32%
Degradado	34%	20%	18%	26%

Según este indicador, es notorio el nivel de degradación física encontrado en los suelos relevados. En lo que respecta a los sistemas agrícolas, el 75% presentó algún tipo de degradación física, mientras que de los sistemas mixtos el 80%. Sin apreciarse una diferenciación entre los niveles de degradación de aquellos suelos en los que se realizó el cultivo de maní.

Los suelos muestreados, en promedio presentan 30% de A+L, por lo tanto, para alcanzar un valor del índice de 9 deberían incrementar su porcentaje de materia orgánica a valores de al menos 2,7%. Este valor se aproxima valor umbral del 3% MO a partir del cual un suelo se torna susceptible a la erosión eólica en regiones semiáridas (Buschiazzo y Aimar, 2003; Buschiazzo, 2006). El 74% de los suelos muestreados presentó valores inferiores a 2,7% MO. Este valor podría ser un tanto difícil de alcanzar y, sobre todo, de mantener en el tiempo, bajo las actuales rotaciones agrícolas predominantes o inclusive mixtas en los suelos de la región medanosa. Sin embargo, en las situaciones naturales el promedio fue de 4,3% MO.

Por lo anteriormente expuesto, surge la necesidad de analizar si los umbrales propuestos por Pieri (1989) debieran ser, como el autor recomienda, ajustados a suelos diferentes de

aquellos para los que fue creado el índice (Pieri, 1995). Este índice señaló los valores de suficiencia en el contenido de materia orgánica del suelo en relación a la superficie del coloide inorgánico presente para la formación de microagregados en un ensayo de larga duración en suelos bajo agricultura en el sur del Sahara (África). Originalmente, el índice de estabilidad estructural de Pieri (1989) fue desarrollado en un ambiente semiárido donde el autor señala la importancia del coloide orgánico como agente de estructuración –estabilidad ante el impacto de lluvias de gran intensidad y corta duración- y como factor determinante de la fertilidad; ya que los suelos del sur de Sahara fueron suelos con menos del 3% MO en situaciones naturales y con 0,5% MO en situaciones agrícolas, con valores de capacidad de intercambio cationico usualmente próximos a $2 \text{ meq.}100\text{gr}^{-1}$, en los que las arcillas predominantes son de tipo 1:1, Caolinitas (Ferruginous tropical soils [FTS]; según la Clasificación Francesa de Suelos, equivalentes en Soil Taxonomy a Ustropepts, Haplustalfs, Plinthustalfs). Con presencia de óxidos de hierro y aluminio que evidencian procesos de meteorización y colapso de las estructuras cristalinas de las arcillas, dejando a la materia orgánica como el principal agente cementante de la estructura. Alcanzar una relación $[\text{MO}/\text{A}+\text{L}]*100$ de 9 en los FTS implica lograr un 0,81% MO. Valor muy inferior al 2,7% necesario cuando la fracción A+L asciende a 30%.

De aquí que es necesario tener presente que los rangos de referencia propuestos por el autor, como él mismo recomienda, deben ser ajustados para suelos con características diferentes. Por lo tanto, los resultados de la relación $[\text{MO}/\text{A}+\text{L}]*100$ hallados en la Pampa Medanosa, fueron comparados con los valores de estabilidad estructural en seco obtenidos con el tamiz rotativo de Chepil (1962). Debe tenerse presente que el St% fue inicialmente creado para suelos en climas semiáridos. El ensayo realizado para su desarrollo se llevó adelante hasta los 20 cm de profundidad, surgió para el estudio de estabilidad frente a erosión hídrica dado que las condiciones climáticas en las que fue llevado a cabo el estudio están marcadas por fuertes eventos de desecación del suelo seguidos por precipitaciones de gran intensidad. Mientras que para la metodología del tamiz rotativo, si bien han sido mencionadas varias profundidades, Chepil (1962) señala el empleo de capas de suelo de 0 a 1, de 1 a 3 y de 3 a 6 pulgadas; en el estudio específico de la erosión eólica.

El St % index -por su denominación en inglés- podría ser un indicador útil en ambientes donde, dados los bajos porcentajes de las fracciones finas del suelo, principalmente de arcilla,

la fracción orgánica adquiere una mayor responsabilidad en la agregación. Por lo que en el siguiente apartado, además de presentarse y discutirse los resultados de estabilidad estructural en seco obtenidos por la metodología de Chepil (1962), se emplearon los mismos para establecer una comparación con los resultados del índice de Pieri y sugerir un nuevo rango de valores para su escala de riesgo a la degradación física, ajustados para la Pampa Medanosa.

3.3. Estado actual e impactos de diferentes usos y manejos del suelo sobre la estabilidad estructural de los agregados superficiales en la Pampa Medanosa

Los valores de estabilidad estructural hallados fueron mayores en sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos que en sistemas bajo agricultura en siembra directa. Los valores exhibidos por los mixtos (EES superiores a 80%, CV%10-15%) fueron próximos a aquellos encontrados en condiciones naturales –N- en la Pampa Medanosa, que en promedio expresaron valores del 80%, con un coeficiente de variación del 9%, un mínimo del 76% y un máximo del 91% (Tabla 19).

Estos resultados coinciden con los hallados por López Fourcade et al. (2008) en suelos Ustipsamments típicos cercanos a la localidad de Washington (Córdoba), quienes reportaron que la situación bajo actividad ganadera en pasturas perennes logró valores de estabilidad estructural similares a los encontrados en situaciones prístinas. Aunque la metodología empleada por estos autores fue diferente, las conclusiones a las que arribaron fueron semejantes. Los resultados de EES% mostrados en el presente estudio en la situación natural concuerdan con los obtenidos por Colazo y Buschiazzi (2010) bajo monte de Caldén. Estos autores hallaron un 86% de EES, empleando la metodología del tamiz rotativo.

Como valor de referencia del máximo deterioro de la estructura se consideró la estabilidad estructural de los médanos fijados. La misma fue en promedio del 60%, con un coeficiente de variación del 21%, un mínimo del 42% y un máximo del 80%. López Fourcade et al. (2008) hallaron una estabilidad estructural nula para médanos vivos, a los que describen como carentes de estructura y de material coloidal. Por lo tanto, se destaca la importancia de

su fijación para la detención del movimiento de sus materiales sueltos y de la consecuente alteración de la capa superficial de suelos próximos (Figura 36).



Figura 36. Agregados de la capa superficial (0-5 cm) de un médano fijado con pastizales.

La situación Mx2 se diferenció de las situaciones agrícolas (P-valor: 0,0026 ;Tabla 19), por el contrario, la situación Mx1 no se segregó de la situación agrícola sin maní –A2- presentando menor EES% que Mx2. No se encontraron diferencias en cuanto a la EES% de situaciones agrícolas cultivadas con maní en comparación con aquellas sin su inclusión en la secuencia de cultivos, a diferencia de lo encontrado por Allochis y Quintana (2017), estos autores observaron disminuida la EES% bajo cultivo de maní en suelos de textura arenosa, mientras que no percibieron sus efectos en suelos de texturas más finas. Los valores hallados para las situaciones agrícolas A2 y A1, 74% y 72%, fueron similares al reportados por Colazo y Buschiazzo (2010) para la provincia de La Pampa 75%. La situación A1 mostró una menor estabilidad que ambos sistemas mixtos. Es decir, que la presión de uso del suelo en este planteo agrícola afecta a la estructura de la superficie en mayor medida que planteos agrícola-ganaderos.

Tabla 19. Valores medios, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación (C.V.%) del porcentaje de Estabilidad Estructural en Seco (EES) obtenida por el método del tamiz

rotativo de Chepil (1962) para las cuatro situaciones de uso y manejo estudiadas en la Pampa Medanosa.

Situaciones de uso y manejo	EES	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.	
Mixto sin maní	87,72	8,95	2,48	10,2	67,44	A
Mixto con maní	83,84	13,24	2,76	15,79	52,31	A B
Agrícola sin maní	73,62	15,96	4,12	21,68	47,01	B C
Agrícola con maní	71,97	18,11	2,86	25,17	27,73	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Dado que estos resultados son similares a los hallados para materia orgánica, y siendo conocida la influencia de esta variable en la estructuración de los suelos, es posible observar que el coloide orgánico tiene una marcada responsabilidad en la estructuración en este ambiente. Según Taboada (2012), el contenido de materia orgánica explica el hallazgo de una mayor estabilidad en suelos bajo pasturas perennes. Este autor señaló también un aumento de la estabilidad estructural al incrementarse la proporción de gramíneas en las secuencias de cultivos, en siembra directa.

Por otra parte, es conocida la influencia de la textura sobre los niveles de materia orgánica de los suelos, la asociación entre sustancias húmicas y las arcillas otorga protección física a la materia orgánica reduciéndose su descomposición (Buschiazzo et al., 1991). Es esperable que ante una mayor proporción de fracciones finas en la matriz sólida del suelo, se logre una mejor estructuración (Porta Casanellas et al., 1999).

Con la finalidad de conocer la relación de la EES con el coloide orgánico e inorgánico de los suelos en el área medanosa del sur de Córdoba, y de, a su vez, proponer un modelo o ecuación de edafotransferencia (e.g. Kay, 2005) que permita la estimación de la EES en la Pampa medanosa, se realizó un análisis de correlación que mostró que el indicador con mayor correlación con la EES fue la materia orgánica (r-Pearson 0,63) seguida por la fracción arcilla más limo (r-Pearson 0,35). Por lo tanto, con estas variables se construyó una función de estimación de la EES.

$$EES\%=39,8037+0,2229*A+L\%+13,7231*[MO\%]$$

El R^2 del modelo fue de 0,42. Es decir, que la ecuación propuesta solo explicó un 42% de la variación de los datos en torno a la recta. La raíz cuadrada del promedio de los residuos elevados al cuadrado (RMSE, por sus siglas en inglés) fue igual a 13,3 mostrando que los valores predichos por el modelo sobreestiman o subestiman en un 13% los valores reales de EES%. La función obtenida no es un adecuado estimador de la EES, probablemente debido a la gran variabilidad hallada en los datos empleados para su obtención, por lo que debiera ser mejorada a través de datos de nuevas muestras. La comparación se efectuó con los resultados obtenidos del tamiz rotativo, empleando solo situaciones antropizadas, sin embargo, la variabilidad de los datos fue alta. Otra de las posibles causas del escaso ajuste del modelo propuesto podría explicarla un comportamiento no lineal en la relación entre estas variables. Colazo y Buschiazzo (2010) lograron un mejor ajuste y un coeficiente de determinación alto al emplear un modelo no lineal, logístico.

Una adecuada estabilidad estructural es fundamental para resisitir disturbios tanto del tipo climáticos - vientos, lluvias- como antrópicos –tránsito, pisoteo- (Taboada, 2012). Por lo que su seguimiento a través de una ecuación de fácil empleo sería de utilidad a los fines de monitorear el efecto del uso y manejo sobre la estructura en la superficie.

Sin embargo, sería recomendable que estos indicadores se incluyeran en un análisis integral del funcionalismo del suelo.

3.4. Estado actual e impactos de diferentes usos y manejos del suelo en la distribución de los agregados superficiales en la Pampa Medanosa

Para los agregados mayores a 19,2 mm el efecto de las condiciones de uso y manejo estudiadas fue significativo (P-valor 0,0032), y, por lo tanto, fue posible apreciar su impacto sobre este tamaño de agregados. Las diferencias se establecieron puntualmente entre la situación Mx2 y ambos manejos agrícolas. Como hasta entonces, Mx1 no se diferenció de A2 y, en esta oportunidad, tampoco lo hizo de A1 (Figura 37).

Los sistemas mixtos agrícola-ganaderos presentaron mayor porcentaje de agregados de diámetro superior a 19,2 mm (33-44%) que los agrícolas (24-26%). Cabe mencionar que los primeros presentaron altos coeficientes de variación (72-75%) dados por sus valores máximos del 65% y 56%. Para Pampa Medanosa, en cercanías de la localidad de Del Campillo, Clerici (2008) encontró que los sistemas de producción mixtos relevados presentaron mayores proporciones de diámetros extremos, esta autora reportó el predominio de agregados mayores a 10 mm y menores a 0,5 mm – utilizando la metodología de De Boodt y De Leenheer (1967)-. Para suelos areno francos de Dios Herrero *et al.* (2017) encontraron un mayor peso de agregados mayores a 19,2 mm al comparar situaciones naturales con campos cultivados, probablemente asociado al aporte orgánico. En una investigación realizada por Allochis y Quintana (2017), los agregados mayores a 19,2 mm se vieron significativamente reducidos en un suelo arenoso cultivado con maní en comparación con el mismo suelo cultivado con maíz.

En cuanto a los agregados de entre 19,2-6,4 mm de diámetro, los sistemas agrícolas mostraron mayores porcentajes (25-26%), siendo diferentes de los mixtos (18%-21%) (p-valor 0,0058) (Figura 38). Los coeficientes de variación en este caso fueron menores que en anterior solo superando el 30% el planteo A1 con 33%.

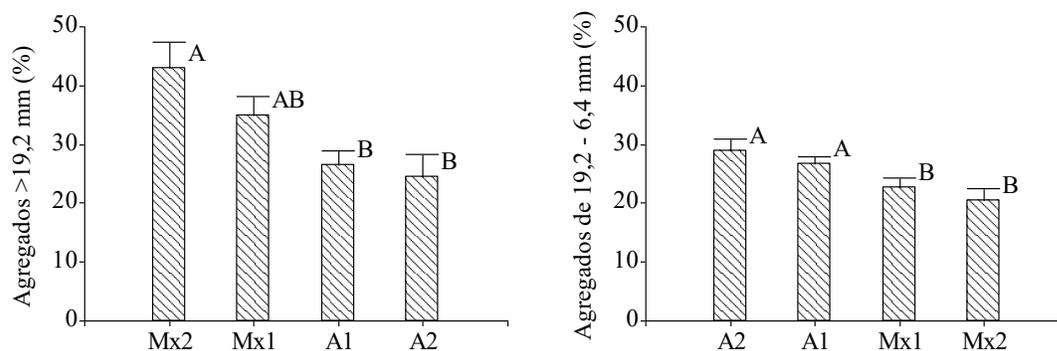


Figura 37 y Figura 38. Porcentaje de agregados mayores a 19,2 mm (izquierda) y de 19,2-6,4 mm de diámetro en suelos bajo usos agrícolas con maní (A1), agrícola sin maní (A2), mixtos con maní (Mx1), mixtos sin maní (Mx2).

En lo que respecta a los agregados de 6,4-2 mm, solo la media del planteo agrícola con maní fue diferente y superior a las medias restantes (p-valor 0,0225). Cabe mencionar que las medias porcentuales de agregados de este tamaño fueron solo de entre el 7,5% y 8,9% (Figura 39), con los coeficientes de variación inferiores a 30%. Allochis y Quintana (2017) encontraron incrementada esta fracción en suelos franco arenosos cultivados con maní respecto al mismo suelo cultivado con maíz.

En el caso de los agregados de 2-0,84 mm, su proporción fue muy pequeña, todas las medias fueron inferiores al 4%. En este caso A2 fue estadísticamente diferente de los planteos con maní (P- valor 0,0054) (Figura 40). Los coeficientes de variación fueron altos y estuvieron entre 30 y 45%. Para este tamaño de agregados Allochis y Quintana (2017) no encontraron diferencias.

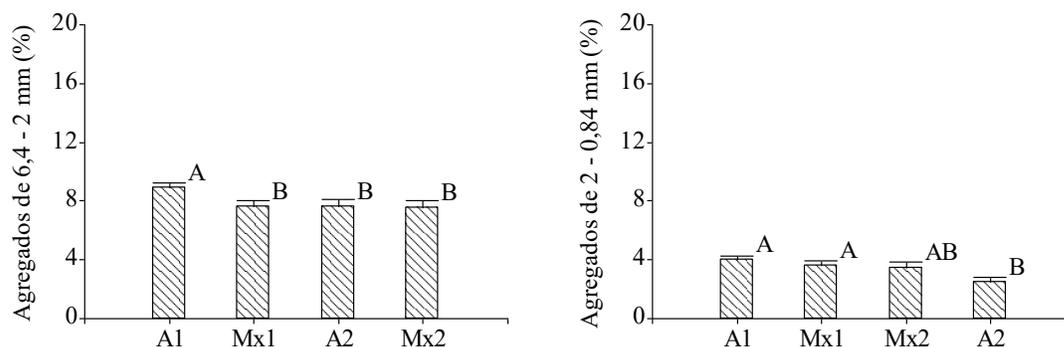


Figura 39 y Figura 40. Porcentaje de agregados de 6,4-2 mm (izquierda) y de 2-0,84 mm de diámetro en suelos bajo usos agrícolas con maní (A1), agrícola sin maní (A2), mixtos con maní (Mx1), mixtos sin maní (Mx2).

Los agregados de 0,84-0,42 mm –parte de la fracción erodable- estuvieron entre 2,2 y 3,9% del peso total de la muestra. Diferenciándose estadísticamente la condición agrícola sin maní que fue la que menor porcentaje de estos agregados presentó (P-valor 0,0319) (Figura 41). Los coeficientes de variación encontrados para este rango de agregados fueron mayores que en el caso anterior (30-60%). Castellini *et al.* (2019) encontraron diferencias al comparar los agregados de este tamaño encontrados en suelos bajo un cultivo de maní con uno de maíz, en un amplio rango de texturas arenoso, franco limoso, franco arenoso y franco.

Y, finalmente, en cuanto a los agregados menores a 0,42 mm, también parte de la fracción erodable, no se encontraron diferencias para el nivel de significancia al que se realizó el análisis (P-valor 0,0867) (Figura 42). Cabe mencionar que los coeficientes de variación fluctuaron entre 30% y 60%. Allochis y Quintana (2017) solo encontraron efectos de la introducción del cultivo de maní sobre los agregados menores a 0,42 mm en suelos de textura arenosa, en suelos con texturas más finas que la mencionada, estos autores no hallaron diferencias, sugiriendo que en los suelos menos resilientes los impactos de la introducción del maní a la rotación son perceptibles. Mientras que, en suelos de texturas más finas, más resistentes, el efecto no se percibe a las frecuencias estudiadas.

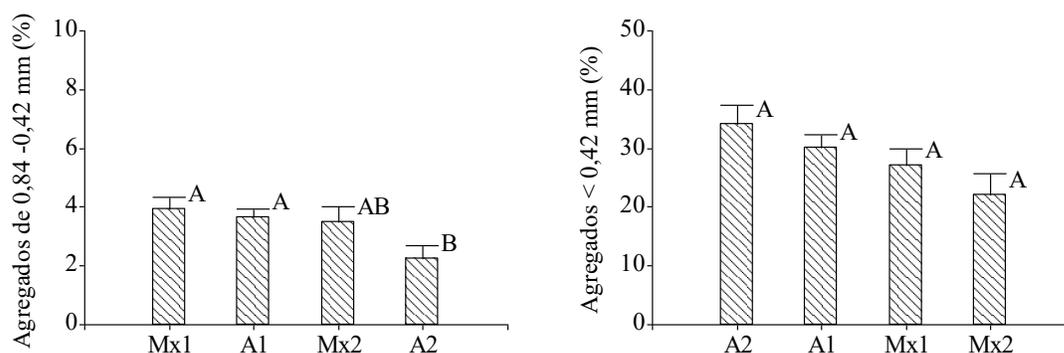


Figura 41 y Figura 42. Porcentaje de agregados entre 0,84-0,42 mm (izquierda) y mayores de 0,42 mm de diámetro en suelos bajo usos agrícolas con maní (A1), agrícola sin maní (A2), mixtos con maní (Mx1), mixtos sin maní (Mx2).

En síntesis, el impacto del uso y manejo del suelo fue mayormente percibido sobre los agregados de diámetros extremos, coincidiendo con lo hallado por López Fourcade (2007). Los agregados mayores a 19,2 mm se vieron reducidos al incrementarse la presión de uso del suelo, al mismo tiempo que aumentó la proporción de agregados de entre 6,4 y 2mm. Por otra parte, se vio incrementada la fracción menor a 0,42 mm en situaciones donde la presión de uso del suelo fue mayor. Según Taboada *et al.* (2012) los macro agregados están más expuestos a afecciones por el uso y el manejo del suelo, ya que la fracción orgánica responsable de su agregación es aquella mayor a 53 μ m, de carácter transitorio, conformada predominantemente por restos vegetales en descomposición. Estos autores señalan que la

materia orgánica que brinda estabilidad a los grandes agregados es constantemente renovada por el aporte de los cultivos y rápidamente accesible al ataque de los microorganismos, en consecuencia, a mayor tamaño de agregados más lábil la materia orgánica que los cementa. De ahí que la afección por el uso y el manejo haya sido más notoria sobre los pedos de diámetros superiores. En un estudio llevado a cabo por Vázquez *et al.* (2001), agregados mayores a 0,1 mm fueron los que exhibieron mayores contenidos de CO liviano y CO total, señalando que la dinámica de las fracciones menos humificadas está ligada a la macro agregación. Por otra parte, Taboada *et al.* (2012) han señalado que los micro agregados (menores a 2,5 mm) son estabilizados por agentes estabilizantes permanentes, sustancias húmicas relacionadas con el CO < 0,053 mm; por lo que estos niveles de agregación son menos afectados por el manejo del suelo.

En la Tabla 20 se observa la correlación entre los agregados de mayor tamaño y el porcentaje de MO% (r-Pearson 0,53) y la correlación negativa que presentó esta misma con los agregados menores a 0,42 mm. Hecho que concuerda resumido por los coeficientes entre los agregados de los mencionados diámetros, ya que, al incrementarse el porcentaje de uno, el del otro disminuye fuertemente. Por otra parte, los agregados de 2-0,84 mm mostraron un coeficiente de correlación de 0,30 con el % de MO. Los agregados mayores a 19,2 mm se correlacionaron positivamente con la fracción A+L%, y del mismo modo que en el caso anterior, los agregados menores a 0,42 mm se correlacionaron negativamente con el porcentaje de A+L. Esto denota la importancia de la materia orgánica y en la estructuración y en la resistencia a la degradación física.

Tabla 20. Coeficientes de correlación r-Pearson para los diferentes diámetros de agregados, porcentaje de materia orgánica (MO%) y la fracción arcilla más limo (A+L%).

Variables	MO%	A+L%	>19,2mm	19,2mm	6,4mm	2mm	0,84mm
A+L %	0,24						
>19,2 mm	0,53	0,32					
19,2 mm	-0,14	-0,16	-0,53				
6,4 mm	0,18	0,04	-0,26	0,36			
2 mm	0,31	0,22	0,05	0,02	0,49		

0,84 mm	0,08	0,05	-0,11	-0,02	0,33	0,62	
<0,42 mm	-0,60	-0,32	-0,86	0,09	-0,07	-0,29	-0,07

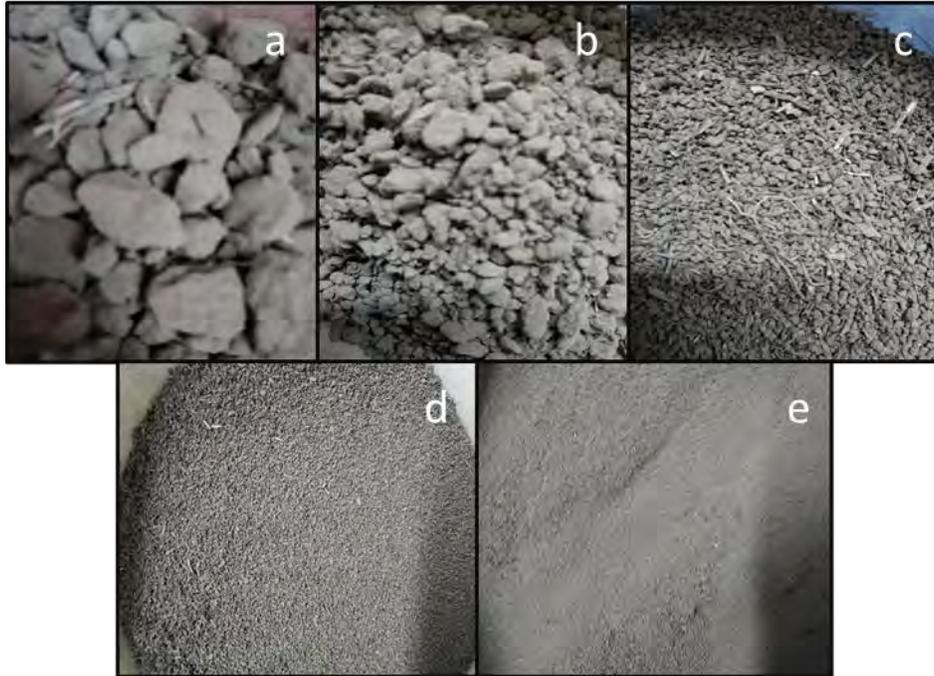


Figura 43. a) Agregados mayores a 19,2 mm. b) Agregados de entre 6,4 mm y 2 mm. c) Agregados de entre 2 mm y 0,84 mm. d) Agregados de entre 0,84 mm y 0,42 mm. e) Agregados menores a 0,42 mm.

Dado que el uso mixto explicó los mayores porcentajes de macro agregados y mostró una mejor estructuración, y que además existió una fuerte correlación negativa entre aquellos pedos mayores a 19,2 mm y los menores a 0,42 mm, es esperable observar un impacto del uso en la fracción erodable. En el siguiente apartado se procede a su análisis.

3.5. Estado actual e impactos de diferentes usos y manejos del suelo sobre la Fracción Erodable (FE) en la Pampa Medanosa

Los resultados derivados del análisis de datos de FE obtenidos por tamizado manual, también conocido como tamizado manual (USDA-NRCS, 2002) fueron similares a los resultados observados en el análisis de datos provenientes de la metodología del tamiz rotativo (Chepil, 1962). Ambas metodologías fueron comparadas encontrándose un ajuste lineal con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,61$ y una RMSE 12,7. El modelo lineal obtenido estuvo representado por la Ec.9 (Figura 44). López *et al.* (2007) lograron un mejor ajuste al comparar el método del tamiz rotativo con un método de tamizado plano automatizado. Este autor obtuvo un modelo lineal similar al encontrado en el presente estudio.

Ec. 9

$$y = 0,651 x + 8,22$$

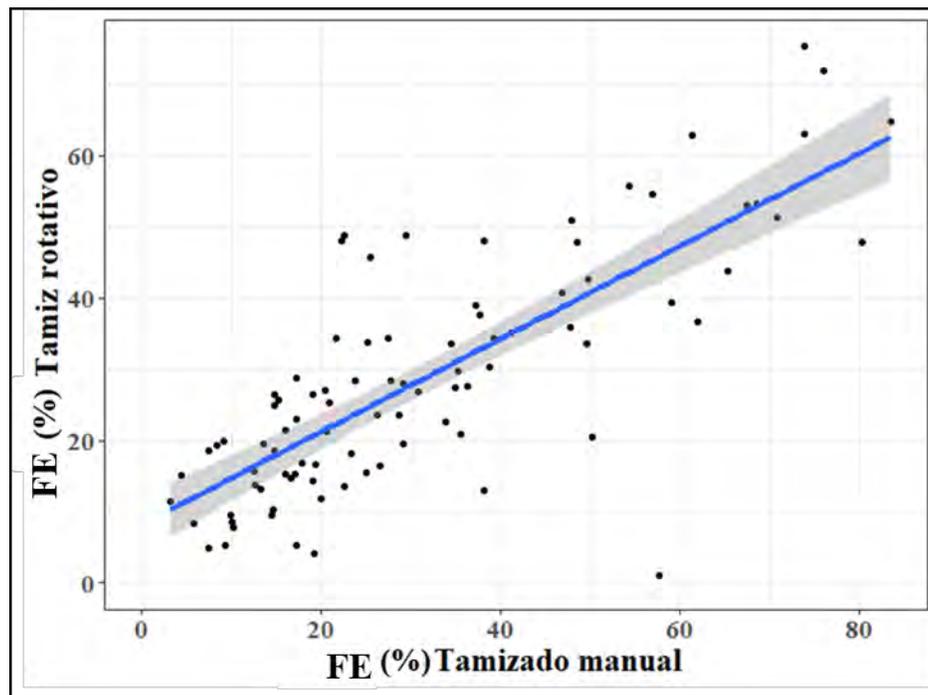


Figura 44. Ajuste de los resultados de fracción erodable (FE) obtenidos mediante tamizado manual y mediante el tamiz rotativo de Chepil (1962). $y = 8,22 + 0,65 x$ ($R^2 = 0,61$). En gris, intervalo de confianza.

El análisis de ambas metodologías evidenció efectos de las situaciones estudiadas sobre la fracción erodable (Tablas 21 y 22) demostrando la sensibilidad de esta variable al uso y manejo del suelo. Se hallaron diferencias estadísticamente significativas entre los contenidos de fracción erodable explicadas por el uso del suelo, mostrando un p -valor $<0,001$ en el caso de la FE obtenida manualmente y un p -valor $<0,0056$ en el caso de la FE obtenida mediante el método del tamiz rotativo.

Tabla 21. Valores promedio, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación (C.V.%) de fracción erodable [FE] -porcentaje de agregados menores a 0, 84 mm- determinada mediante tamizado plano (USDA-NRCS, 2002) en diferentes situaciones de uso y manejo del suelo en la Pampa Medanosa.

Situaciones	n	FE	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.	
Agrícola con maní	85	38,20	22,64	59,27	5,00	94,88	A
Agrícola sin maní	70	32,41	19,38	59,79	4,38	87,60	A B
Mixto con maní	28	25,27	14,80	58,56	4,18	65,40	B C
Mixto sin maní	32	20,60	14,54	70,59	1,20	53,36	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 22. Valores promedio, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación (C.V.%) de fracción erodable [FE] -porcentaje de agregados menores a 0, 84 mm determinados mediante el tamiz rotativo (Chepil, 1962) - en diferentes situaciones de uso y manejo del suelo en la Pampa Medanosa.

Situaciones	n	FE	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.	
Agrícola con maní	40	33,35	17,92	53,73	1,01	75,27	A
Agrícola sin maní	15	33,26	17,34	52,12	8,42	62,87	A B
Mixto con maní	23	23,24	12,77	54,94	4,11	50,84	B C
Mixto sin maní	13	18,10	9,40	51,92	4,92	33,54	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El uso agrícola que incluyó el cultivo de maní en sus rotaciones (A1) fue la condición de uso y manejo que presentó una mayor fracción erodable en ambos casos (Tablas 21 y 22), encontrándose estos valores muy próximos al valor umbral de 40% mencionado por Tatarko (2001). A1 no se diferenció estadísticamente de la situación agrícola sin cultivo de maní (A2) en ninguno de los dos casos, habiendo esta última presentado valores levemente inferiores a A1 en el tamizado manual y muy similares en el tamizado rotativo. Allochis y Quintana (2017) en suelos arenosos, señalaron la existencia de diferencias estadísticamente significativas para esa textura en particular en dos situaciones agrícolas cultivadas, una con maíz y otra con maní. Sin embargo, los autores mencionan que encontraron incrementada la FE bajo cultivo de maní en todos los sitios estudiados, aunque solo fuese significativo en el ambiente más arenoso, más susceptible a procesos de degradación física.

En comparación con los sistemas mixtos agrícola-ganaderos, A1 fue estadísticamente diferente y superior en FE% para sistemas de producción mixtos con y sin maní, hecho que denota la sensibilidad de este indicador a los cambios de uso del suelo en el área medanosa del sur de Córdoba. Es necesario mencionar la gran variabilidad encontrada para este atributo, ya que el rango de valores máximos y mínimos encontrado fue considerablemente amplio en todas las condiciones de uso y manejo evaluadas, en concordancia por lo observado para este indicador en suelos de la provincia de La Pampa por Allochis y Quintana (2017).

Los valores de FE encontrados bajo condiciones naturales, referentes de la mínima intervención antrópica, también fueron altos; dadas las características intrínsecas de los suelos de la región. Estos valores fueron de 31,43% mediante el tamizado manual y de 30,39% mediante el tamiz rotativo. Para la provincia de San Luis, de Dios Herrero *et al.* (2017), obtuvieron valores medios de FE% mayores en situaciones naturales que bajo agricultura (48,6% y 42,1%, respectivamente) en suelos franco arenosos, no así en suelos areno francos donde estos autores observaron que la FE% de la situación cultivada fue mayor que la prístina (69,9% y 61,5%, respectivamente). Sin diferencias significativas estadísticamente. Coincidiendo con Allochis y Quintana (2017), quienes señalan efectos del uso sobre la FE% en suelos más frágiles. Por otra parte, Skidmore *et al.* (1975) reportaron que no encontraron efectos del uso agrícola en un suelo franco limoso de Kansas (EEUU) al

compararlo con un suelo no cultivado, apoyando el supuesto de que suelos con texturas más finas y mejor estructurados son menos alterables por el uso y el manejo.

Los contenidos de fracción erodable observados, en promedio, para los usos agropecuarios fueron inferiores a los valores medios hallados para la situación referente del máximo deterioro, los médanos fijados presentaron 57,39% y 53,86% para las dos metodologías empleadas. Sin embargo, no significa que todos los usos agropecuarios hayan tenido un valor aceptable de FE%, ya que 99 de los 283 sitios relevados presentaron valores de FE% superiores al umbral del 40%. Clerici (2008) reportó para suelos bajo agricultura muy degradados de la Pampa Medanososa valores de 93,02% de fracción erodable.

Colazo y Buschiazzo (2010), en suelos con A+L de entre 20-50%, encontraron incrementos del 18% de FE en campos agrícolas comparativamente a situaciones de monte nativo de Caldén. En el presente estudio esta comparación no se realizó ya que la FE % de referencia de N fue superior a los hallados en los suelos con uso agropecuario, por lo tanto, la comparación se efectuó entre condiciones agrícolas y mixtas.

Los sistemas mixtos presentaron valores de FE% inferiores a los de N; 10% menos en Mx2 y 5% menos en Mx1. Las pasturas perennes reducen la proporción de la fracción erodable, esto se observa al comparar los Mx2, sin cultivo de maní con los suelos bajo agricultura continua.

En el caso de estudio los suelos bajo agricultura mostraron valores de FE similares a los de los suelos bajo vegetación nativa. En promedio, los suelos de la región presentaron 30% de A+L y sus texturas fueron predominantemente gruesas. Colazo y Buschiazzo (2010) compararon la FE de condiciones prístinas y bajo agricultura en suelos con menos de 21,5% de A+L y no encontraron efectos del uso. La mayoría de sus datos estuvieron por encima del valor crítico del 40%, por lo tanto, estos autores, atribuyeron la ausencia de sensibilidad de esta variable en suelos de texturas gruesas al uso y manejo, a la dificultad que presentan este tipo de suelos para formar agregados estables frente a la erosión.

Por otro lado, en un estudio realizado hacia el oeste de la provincia de Buenos Aires, Druille *et al.* (2013a) encontraron valores de un 30% más de FE % en situaciones agrícolas en comparación con ganadería sobre pastura permanente de llorón, lo que coincide con lo

reportado por López Fourcade *et al.* (2008) en la Pampa Medanososa. Ambos grupos de autores lo atribuyen a un mayor contenido de materia orgánica.

El hallazgo de un menor porcentaje de FE bajo los sistemas de producción mixtos que en las condiciones naturales, en conjunto con lo expuesto por Druille *et al.* (2013), López Fourcade *et al.* (2008) y Colazo y Buschiazzo (2010), podría estar sugiriendo que la mejor redistribución de la materia orgánica lograda en suelos bajo pasturas en comparación a suelos bajo montes induce un menor porcentaje de agregados erosionables por el viento. Sería interesante seguir investigando sobre esta hipótesis, como estrategia de recupero de suelos degradados mediante la implementación de pasturas para ganadería.

Ante el amplio rango de valores observados en los resultados encontrados por los autores mencionados en esta discusión, se observa que la FE es un indicador muy variable como lo han señalado con anterioridad algunos autores (Allochis y Quintana, 2017; de Dios Herrero *et al.*, 2017). Se destaca que, ante el empleo de dos metodologías diferentes –aun cuando para la metodología del tamiz rotativo se empleó un sub set de muestras seleccionadas al azar- los resultados fueron coincidentes y significativos.

3.5.1. Relación entre la fracción erodable y la fracción orgánica del suelo

La fracción erodable presentó una correlación negativa con la fracción orgánica, r-Pearson -0,59. La relación entre estas dos variables en los sistemas productivos estudiados fue explicada por una regresión no lineal. El modelo matemático que logró un mejor ajuste según los criterios AIC (Akaike, 1973) y BIC (Schwarz, 1978) fue aquel que describió una función lineal con *plateau* (Figura 45).

La función matemática de ajuste lograda fue:

Ec. 10

$$\mathbf{FE (\%)} = \mathbf{\alpha + (\beta * CO) * (CO < \gamma) + (\beta * \gamma) * (CO \geq \gamma)}$$

Donde los valores estimados para el modelo fueron:

γ : 13,44 g. kg⁻¹ (contenido de CO a partir del cual, cambios en el CO no inducen cambios en la FE).

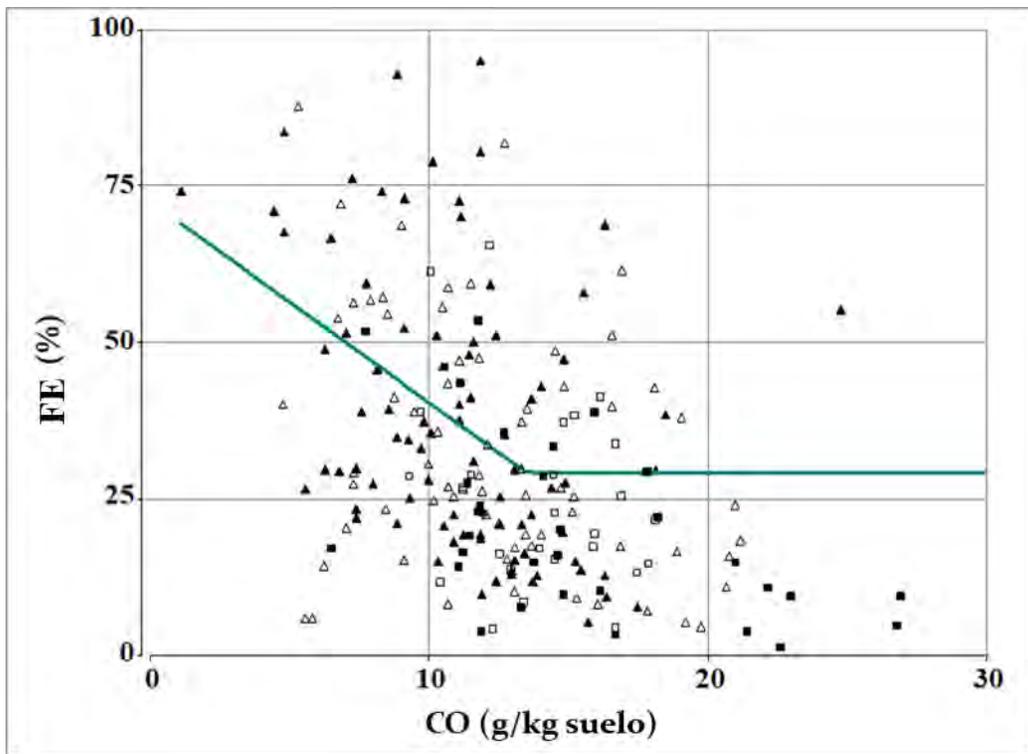
α : 69,73 % (valor de FE para CO =0)

β : -3,08 (tasa de disminución de la FE en función del CO)

Reemplazando los valores de los parámetros determinados en la Ec.10, se obtuvo la siguiente expresión:

Ec. 11

$$FE (\%) = 69,73 + (-3,08 * CO) * (CO < 13,44 \text{ grs. kg}^{-1}) \\ + (-3,08 * 13,44 \text{ grs. kg}^{-1}) * (CO \geq 13,44 \text{ grs. kg}^{-1})$$



Figuras 45. Comportamiento de la fracción erodible (FE) (agregados <0,84 mm) en función del contenido de carbono orgánico del suelo (CO) (g. kg⁻¹). Referencias: cuadrados negros: mixtos sin cultivo de maní; cuadrados blancos: mixtos con cultivo de maní; triángulos negros: agrícola con cultivo de maní; triángulos blancos: agrícolas sin cultivo de maní.

Los modelos no lineales, no han sido ampliamente empleados para explicar la relación entre FE y CO, en general, esta relación ha sido ajustada por modelos lineales (Fryrear *et al.*, 1994; López *et al.*, 2007). Algunos autores han presentado modelos del tipo no lineal. Druille *et al.* (2013a) encontró una relación de tipo exponencial en el SO bonaerense entre la FE y el CO de un suelo bajo una pastura permanente de pasto llorón con actividad ganadera ($r^2=0,54$). Buschiazzo (2006) y Colazo y Buschiazzo (2010) utilizaron un modelo logarítmico para explicar la relación entre estas dos variables en suelos con agricultura de la provincia de La Pampa, logrando un mejor ajuste y señalando que el empleo de modelos no lineales en la descripción de esta relación, hace posible aproximar valores umbrales de la fracción orgánica a partir de los cuales la FE cambia suavemente (Colazo y Buschiazzo, 2010). En este estudio el valor crítico de CO encontrado en la Pampa Medanosa, ante el empleo de un modelo representado por una función lineal con plateau fue de 13,44 g. kg⁻¹. Incrementos del CO por encima del umbral no indujeron cambios en el porcentaje de agregados erosionables por el viento.

El valor umbral de CO a partir del cual no se aprecian cambios en la FE, o esta cambia muy débilmente, varía en función de la proporción de arcilla y limo presentes en los suelos.

Ante el valor umbral de CO (γ) para esta región, el valor de FE % es mínimo. Por otra parte, ante este valor de CO se estaría también ante una alta estabilidad de agregados, ya que al disminuir FE % se incrementa la EES%. Esto puede observarse en la Figura 46, donde fue graficada la relación no lineal entre estas dos variables explicada por la ecuación 12. El cambio en el porcentaje de EES se reduce a partir del mencionado valor crítico de 13,44 g. kg⁻¹ de CO, habiendo alcanzado una EES igual a 81,09 %. Se observa además la mayor EES alcanzada por los sistemas mixtos, mientras que las muestras por debajo de 80% fueron predominantemente de situaciones agrícolas.

Ec. 12

$$EES\% = \frac{97,80}{1+1,8^{(-0,2*CO)}}$$

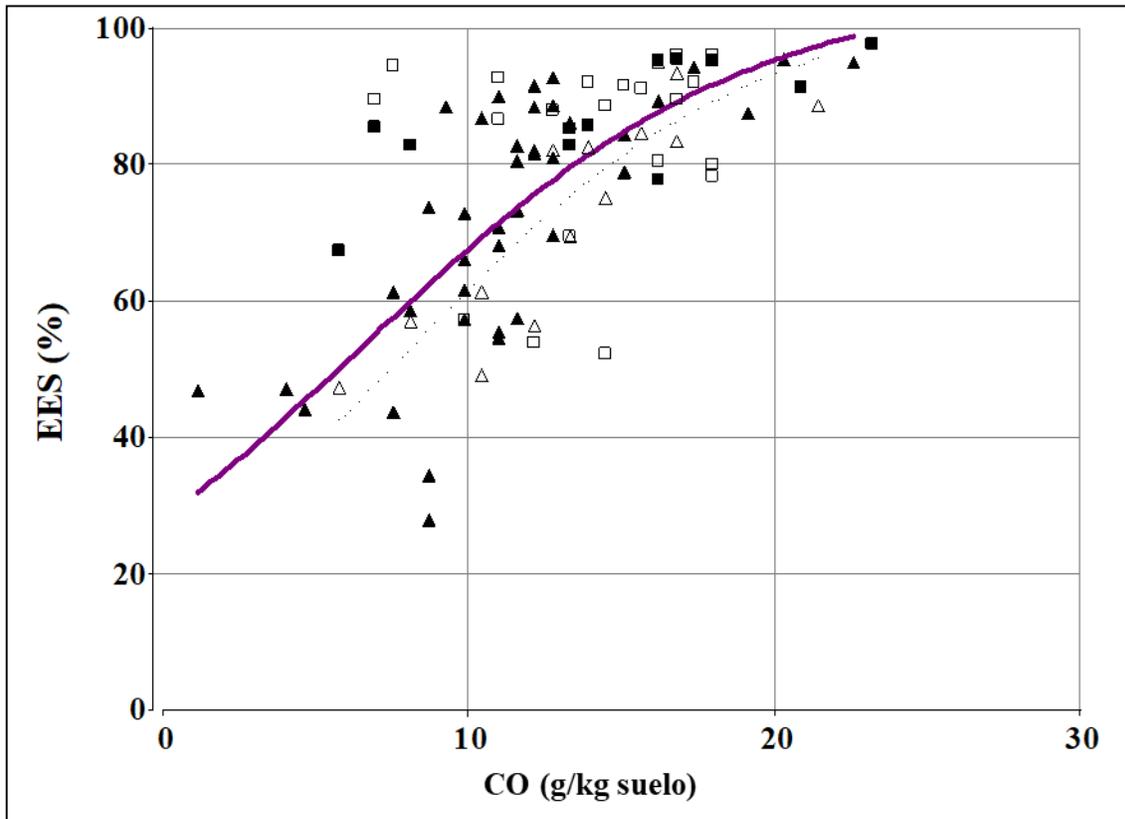


Figura 46. Comportamiento de la estabilidad estructural en seco (EES) en función del contenido de carbono orgánico del suelo (CO) (g. kg^{-1}). Referencias: cuadrados negros: mixtos sin cultivo de maní; cuadrados blancos: mixtos con cultivo de maní; triángulos negros: agrícola con cultivo de maní; triángulos blancos: agrícolas sin cultivo de maní.

Entonces, sería factible reemplazar γ en la ecuación de Pieri (1989), para un valor medio regional de A+L de 30%, logrando ajustar este índice a los suelos de la región medanosa del sur de Córdoba. El valor del St% de Pieri (1989) que indicaría suelos estables frente a la degradación física – $\text{EES} \geq 81,09\%$ - en la región medanosa del sur de Córdoba sería de 7,7 en lugar de 9 en la escala de Pieri. Este valor surge de llevar $13,44 \text{ gr.kg}^{-1}$ de CO a porcentaje de materia orgánica (MO%) y reemplazarlo en la ecuación del índice de Pieri tomando el valor de A+L medio de la región.

Para calcular los restantes valores del índice de Pieri adaptados a la región de la Pampa Medanosa, se determinó, a partir de la Ec. 12, el valor de CO para 70 %y 60 % de EES.

Luego este valor fue transformado a MO y se reemplazó en la ecuación de Pieri para obtener los nuevos valores de la escala presentados en la Tabla 23.

Se entiende entonces que suelos con menos del 7% de A+L en materia orgánica presentan riesgo a la degradación física, y que suelos con valores inferiores del 0,62% A+L en materia orgánica estarían totalmente degradados. Este valor se obtiene tras reemplazar el la MO correspondiente a una EES de 60% en el índice de Pieri, ya que este porcentaje es el valor de EES que presentaron en promedio las muestras de médanos fijados procesadas en el tamiz rotativo.

En la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos, sin embargo, es necesario mencionar que se procesaron mediante el tamiz rotativo 90 muestras en total, por lo tanto, se considera que, dada la variabilidad observada, sería recomendable mejorar el ajuste del índice a la Pampa Medanosa mediante el incremento del número de muestras en estudios posteriores teniendo en cuenta que Pieri (1989) trabajó inicialmente con 400 muestras.

Tabla 23. Comparación entre la escala original de Pieri (1989) para FTS en el oeste de África y la escala ajustada para la región de la Pampa Medanosa Cordobesa.

Riesgo a la degradación física	Escala original del St% Pieri (1989)	Estabilidad estructural (%)	Carbono Orgánico (g.kg⁻¹)	Materia orgánica (%)	Escala ajustada para la Pampa Medanosa	Escala simplificada
<i>Estable</i>	St% ≥9	≥80%	13,44	2,3 a +	St% ≥ 7,7	St% ≥ 8
<i>Moderado riesgo a la degradación física</i>	St% 9-7	80-70%	13,44-7,85	2,3-1,35	St% 7,7-4,5	St% 8-5
<i>Alto riesgo a la degradación física</i>	St% 7-5	70-60%	7,85-3,93	1,35-0,7	St% 4,5-2,3	St% 5-2
<i>Degradado</i>	St% ≤5	≤60%	≤3,93	Menos de 0,7	St% ≤ 2,3	St% ≤ 2

*Cálculos disponibles en el Anexo I.

3.5.2. Relación entre la fracción erodable y los contenidos de arena, arcilla y limo

La relación entre la FE y las fracciones arena y arcilla + limo (A+L) en los suelos bajo sistemas productivos de la Pampa Medanosa presentaron una correlación moderada, el valor de r-Pearson obtenido para la relación con arena fue de 0,31 (P-valor <0,0001) indicando una relación lineal positiva; y para la relación con la fracción A+L el r-Pearson fue de -0,31 (P-valor <0,0001) describiendo una relación lineal negativa (Figuras 47 y 48). Fueron testeados ajustes no lineales logarítmicos y exponenciales, lográndose mejores AIC y BIC con el modelo lineal.

La función que describe la disminución de la fracción erodable en relación al contenido de A+L corresponde a la siguiente ecuación:

Ec. 13

$$\mathbf{FE(\%) = 47,96 - 0,50 * (Arcilla + Limo \%)}$$

Mientras que la función que describe el incremento de la fracción erodable en relación al contenido de arena fue descrita por la siguiente ecuación²³:

Ec. 14

$$\mathbf{FE (\%) = -1,75 + 0,50 * (Arena \%)}$$

En las Figuras 47 y 48 puede apreciarse que la relación entre la FE y ambas fracciones es precisamente inversa, ya que, entre ambas fracciones, existió una correlación inversa perfecta r-Pearson igual a -1.

Aquellas muestras de suelo con porcentajes de fracción erodable superiores al 40%, presentaron en promedio 29% de A+L y 71% de arena.

²³ Esta función carece de utilidad para contenidos de arena iguales o menores al 3,5%.

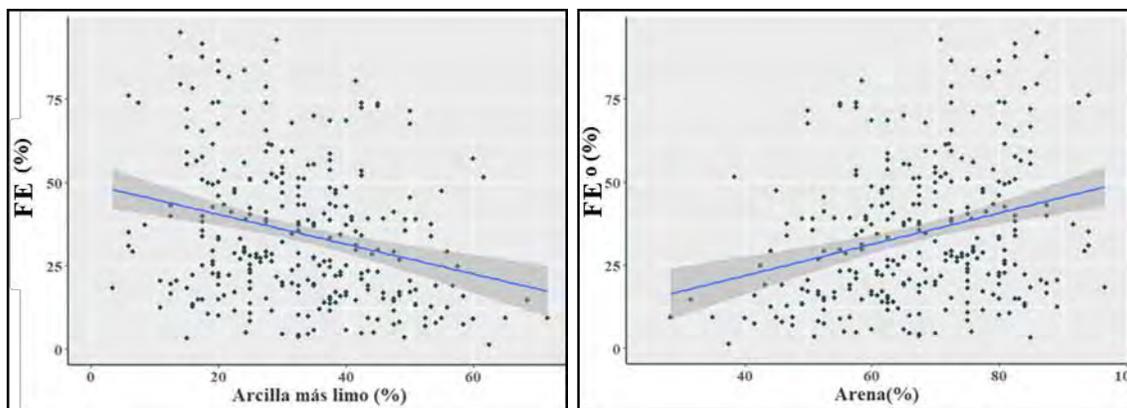


Figura 47 y Figura 48. Comportamiento de la fracción erodable (agregados <0,84mm) (FE) en función del contenido de fracciones arcilla y limo del suelo (izquierda) y en función del contenido de la fracción arena del suelo (derecha). En gris, intervalo de confianza.

A nivel de partículas elementales, en suelos de texturas más gruesas como los de la región medanosa, la proporción de FE será naturalmente mayor a causa de una menor agregación. Al incrementarse las proporciones de arena, las fuerzas físicas de cohesión y adhesión se debilitan ya que las partículas son más grandes, los puntos de contacto se reducen y los poros adquieren mayores diámetros, permitiendo que la humedad se pierda con mayor facilidad. Sumado a esto, ante bajos porcentajes de arcilla, las fuerzas físico-químicas (Van der Waals) y las fuerzas químicas generadas por los cationes divalentes que conforman puentes catiónicos entre partículas individuales y la materia orgánica también serán menores.

Sin embargo, la fracción erodable no puede ser estimada solamente en función de los contenidos de arena, arcilla y limo, sino que depende de múltiples factores. En parte, como se pudo apreciar el incremento de la FE fue explicado por la ruptura de agregados mayores por el uso, la mayor mineralización de sustancias húmicas y la menor proporción de cementos estructurantes de macro agregados como hifas de hongos, gomas microbianas y raíces.

Por lo tanto, se analiza a continuación y para la región del estudio, la utilidad del modelo propuesto por López *et al.* (2007) que estima la FE en función de la materia orgánica y del porcentaje de arcilla más limo para la Región Pampeana Semiárida Argentina.

3.5.3. Comparación de la fracción erodable observada en la Pampa Medanosa con valores estimados mediante la ecuación utilizada en la versión en español de la Ecuación de la Erosión Eólica (EWEQ).

El modelo matemático presentado por López *et al.* (2007) que integra la versión de la Ecuación de la Erosión Eólica en español (EWEQ) adaptada para la región Pampeana Semiárida Argentina por Panebianco y Buschiazzo (2008) responde a la siguiente ecuación:

Ec. 15

$$FE (\%) = 9,98 + 6,91 * \frac{\text{Arena } (\%)}{\text{Arcilla } (\%)} + \frac{14,1}{\text{Materia orgánica } (\%)}$$

Esta ecuación permite la estimación de la fracción erodable a través de las variables que mostraron una correlación más fuerte con ella. La importancia de lograr un buen ajuste de los datos de la región con esta ecuación radica en que es la función que se incluye en la EWEQ, que es empleada para estimar la pérdida potencial de suelo. El ajuste de la función propuesta por López *et al.* (2007) a los datos de fracción erodable observados en la Pampa Medanosa fue de un 58%. La ecuación sobreestimó los valores de agregados menores a 0,84 mm de los sitios relevados en el sur de Córdoba. Estos resultados concuerdan con lo hallado en trabajos llevados adelante en la Pampa Medanosa por Clerici (2008) y Lopez Fourcade (2007). Para el Chaco Semiárido, Rojas *et al.* (2013) halló que la ecuación subestimó valores elevados de FE en suelos de monte y sobreestimó los de suelos agrícolas. Ello implica que el empleo de la EWEQ en la Pampa Medanosa indicara pérdidas potenciales de suelo por erosión eólica mayores a las en realidad posibles.

López *et al.* (2007) ajustaron la ecuación empleando datos de la provincia de la Pampa y de Aragón (España). Los suelos de Aragón tienen grandes cantidades de CaCO₃ comparativamente a la Pampa Medanosa. En general los valores de arcilla y limo de los suelos empleados para construir el modelo fueron mayores a los presentes en los suelos relevados del sur de Córdoba. La responsabilidad de la materia orgánica en la agregación

parecería ser mayor en la Pampa Medanosa que en los suelos para los que fue creada la ecuación.

Por otra parte, la relación entre la FE y la MO que define la ecuación es inversa y lineal. Una de las causas de esta sobreestimación, podría ser que la relación entre la materia orgánica y la fracción erodable no responde a un modelo lineal en la región de estudio como puede observarse en la Figura 49. La pérdida de un punto de MO por encima del valor crítico hallado no representará 14,1 de incremento en la FE, sino que este será menor. Este incremento en la FE será gradualmente mayor a medida que el valor de MO en el suelo se reduzca. El comportamiento observado en la presente investigación fue explicado por un modelo lineal con plateau, resultados que también reportaron con anterioridad Druille *et al.* (2013a) proponiendo un modelo exponencial en suelos del SO Bonaerense y Colazo y Buschiazzo (2010) proponiendo un modelo logístico en suelos de La Pampa. Todos ellos coinciden en que al reducirse la MO por debajo de un determinado valor umbral la FE comienza a incrementarse con más intensidad. Lo que sugiere que el segundo término del modelo propuesto por López *et al.* (2007), al ser usado en la Pampa Medanosa, podría no estar reflejando con precisión el cambio en la FE ante la variación del contenido de MO del suelo.

Por otra parte, existe una variable que no ha podido ser incluida en la ecuación y es el uso del suelo. Variaciones en la FE como respuestas a cambios en la MO reflejan gran parte de los cambios inducidos el uso y el manejo del suelo y de aquí la importancia de un modelo apropiado a la región, pero no lo hacen en su totalidad. En la Figura 49 se visualizan muestras de A1 que se alejan del valor medio de FE para esta variante de uso (plano en rojo), la variabilidad presente es alta hacia ambos lados del plano y puede estar alertando sobre impactos positivos o negativos generados por variantes de uso y de manejo propias de los sitios, por ejemplo, la implementación de cultivos cobertura que a través de su aporte de materia orgánica y de sus sistemas de raíces homorrizos propician la estructuración. Lo mismo ocurrió con los sistemas mixtos, visible con mayor intensidad en los Mx2, en los que existieron un considerable número de datos inferiores a la media (plano en verde) que podría deberse a un mayor tiempo bajo pasturas o una mayor proporción de gramíneas en las rotaciones que aumente la fracción orgánica, o bien un manejo diferente de la carga animal.

Todo ello indica que el empleo de la EWEQ, probablemente, sobreestime la pérdida potencial de suelo por erosión eólica en los suelos del sur de Córdoba

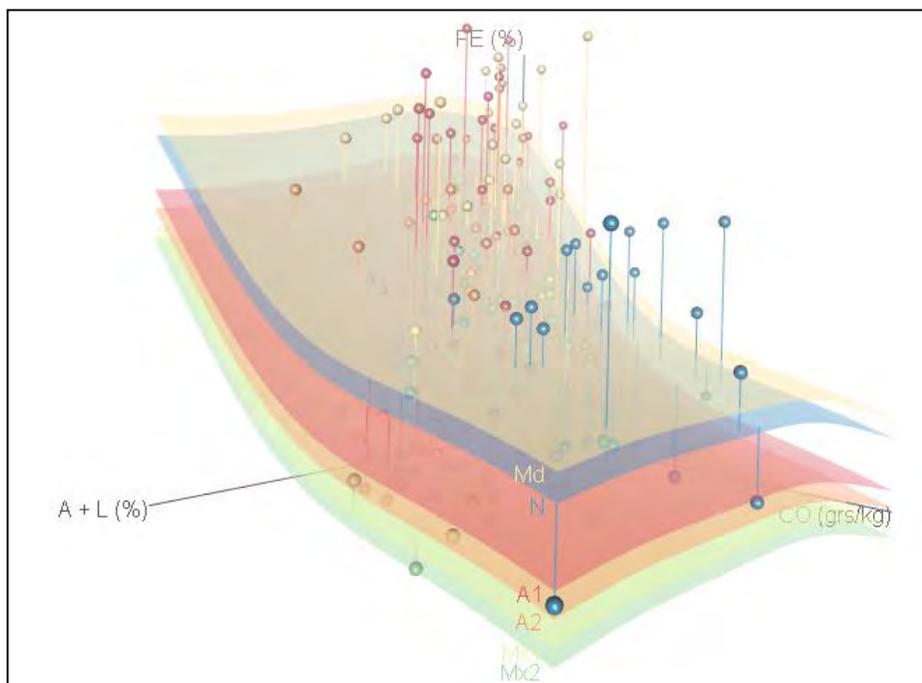


Figura 49. [Seguir el hipervínculo para ver la Figura 3D en movimiento.](#) Comportamiento de la fracción erodable (FE) -eje y- ante la variación simultánea de la materia orgánica (%) -eje x-y de la fracción arcilla más limo (%) -eje z-, en la Pampa Medanosa. En color, las superficies de las curvas descriptas por la regresión entre estas variables en cada situación de uso y manejo del suelo estudiada. Md: médano (coral); N: natural (azul); A1: agricultura con maní (rojo); A2: agricultura sin maní (anaranjado); Mx1: mixto agrícola-ganadero con maní (amarillo); Mx2: mixto agrícola-ganadero sin maní (verde). Los puntos representan los datos recolectados y su desviación desde la media.

3.6. Estado actual e impactos del uso y del manejo del suelo sobre el pH en la Pampa Medanosa

Los valores de promedio pH hallados para los usos y manejos evaluados, se encontraron próximos a los valores del intervalo adecuado para la mayoría de los cultivos, 6,1-6,5 (Porta Casanellas *et al.*, 1999). Es decir, que no existe actualmente una reducción en la calidad edáfica reflejada por esta variable, como así tampoco se apreció efecto alguno explicado por el uso actual (Tabla 24).

Tabla 24. Valores medios, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación (C.V.%) del pH de 0 a 20 cm para las cuatro situaciones antrópicas estudiadas en la Pampa Medanosa.

Situaciones	Profundidad	n	pH	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.
Agrícola con maní	0-5 cm	85	6,49	0,29	4,47	5,61	7,11
Agrícola sin maní	0-5 cm	70	6,48	0,46	7,05	5,5	7,54
Mixto con maní	0-5 cm	28	6,29	0,57	9,04	5,35	7,82
Mixto sin maní	0-5 cm	32	6,36	0,42	6,53	5,5	7,29
Agrícola con maní	5-10 cm	85	6,32	0,35	5,58	5,64	7,3
Agrícola sin maní	5-10 cm	70	6,23	0,45	7,21	5,38	7,32
Mixto con maní	5-10 cm	28	6,17	0,32	5,16	5,61	6,81
Mixto sin maní	5-10 cm	32	6,34	0,39	6,17	5,64	7,29
Agrícola con maní	10-20 cm	85	6,56	0,35	5,35	5,89	7,22
Agrícola sin maní	10-20 cm	70	6,69	0,42	6,34	5,95	7,73
Mixto con maní	10-20 cm	28	6,61	0,27	4,07	6,13	7,08
Mixto sin maní	10-20 cm	32	6,6	0,55	8,38	4,43	7,46

La acidificación del suelo es un proceso que ocurre naturalmente en todo suelo sujeto a lixiviación, presentando diferente magnitud según el ambiente. En climas templados, la remoción de bases dada su exportación en cosechas y la acidificación por fertilización cobran mayor importancia (Vázquez y Millán, 2017). Si bien en el presente estudio, y como se explicará en los siguientes apartados, el uso reflejó remoción de bases, no se observó un impacto de ello en el pH. Algunos autores han encontrado disminuido el valor de pH en suelos de la Región Pampeana y lo han explicado por el uso agrícola. Según Álvarez y Rubio (2012), la actividad agrícola puede modificar significativamente el pH de un suelo a través del reemplazo de las bases removidas del complejo de cambio por iones hidrógeno. Urricariet y Lavado (1999) en la Pampa Ondulada señalaron disminuciones del pH una condición agrícola respecto a la condición prístina. Rozas *et al.* (2011), encontraron valores de pH actual 4,2% menores en suelos agrícolas que en suelos prístinos (6,58 vs 6,87).

Para la región, el valor medio de pH de la condición prístina fue inferior al de las condiciones de uso agropecuario en promedio en medio punto de pH, probablemente debido a los aportes de los protones provenientes de la disociación de los grupos carboxilos de los

ácidos de la materia orgánica bajo los montes. Del total de las muestras en condiciones naturales, solo 5 fueron provenientes de pastizales en las que su pH medio fue de 6,29, 6,73 y 7,09 para cada profundidad respectivamente (Tabla 25). Las restantes, fueron provenientes de montes. El pH promedio de todas las situaciones naturales fue de 5,98, 5,97 y 6,4 para cada profundidad analizada (Tabla 26). De todos modos, en ambas situaciones los valores de pH fueron menores a las situaciones con usos agropecuarios.

Tabla 25. Valores medios, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación (C.V.%) del pH de 0 a 20 cm para pastizales naturales en la Pampa Medanosa.

Profundidad	n	pH	D.E.	CV
0-5cm	5	6,29	0,31	4,92
5-10cm	5	6,73	0,49	7,35
10-20cm	5	7,09	0,64	8,97

Tabla 26. Valores medios, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación (C.V.%) del pH de 0 a 20 cm para las condiciones de referencia estudiadas en la Pampa Medanosa.

Situaciones	Profundidad	n	Media	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.
Médano	0-5 cm	33	6,47	0,41	6,39	5,65	7,33
Natural	0-5 cm	35	5,98	0,58	9,72	4,83	7,39
Médano	5-10 cm	33	6,60	0,51	7,76	5,50	7,81
Natural	5-10 cm	34	5,97	0,59	9,89	4,73	6,96
Médano	10-20 cm	33	6,80	0,48	7,10	5,58	7,73
Natural	10-20 cm	35	6,40	0,42	6,56	5,55	7,12

Si bien en el caso de estudio no se han percibido variaciones en el pH explicadas por los usos estudiados, no deja de ser un indicador de suelo fundamental a monitorear. Pezzini (2010) para suelos de la zona en estudio, reportó valores de pH cercanos a 6, y saturación con Ca inferior al 60 %. Un proceso muy sensible a las variaciones en este indicador es la fijación biológica del nitrógeno cuyo valor óptimo es seis (Álvarez y Rubio, 2012). Además, no solo estaría afectando los procesos biológicos y la disponibilidad nutricional, sino que, además, algunos autores, mencionan que el proceso de acidificación de un suelo tiene incidencia indirecta sobre algunas de sus propiedades físicas como la estabilidad estructural

(Vázquez y Millán, 2017). Magra y Ausilio (2004) señalan que suelos ácidos templados presentan menor agregación, permeabilidad y aireación por la remoción de los cationes divalentes que constituyen puentes iónicos entre los cristales de arcillas y otras partículas promoviendo la estructuración.

3.7. Estado actual e impactos del uso y del manejo del suelo sobre la capacidad de intercambio catiónico en la Pampa Medanosa

Para los suelos de la Pampa Medanosa, se encontraron diferencias altamente significativas en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) explicadas por los usos y manejos estudiados y en las tres profundidades (P-valor < 0,0001; Tabla 27). Lo que significa que los sistemas agropecuarios estudiados reducen de algún modo la CIC de los suelos.

Tabla 27. Valores promedio, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación (C.V.%) de la capacidad de intercambio catiónico [CIC] (Cmol. kg⁻¹) en diferentes situaciones de uso y manejo en la Pampa medanosa a tres profundidades 0-5 cm, 5-10cm y 10-20cm.

Situaciones	Prof.	n	CIC	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.	
Natural	0-5 cm	35	12,58	4,48	35,63	5,43	25,22	A
Mixto sin maní	0-5 cm	32	10,95	3,34	30,51	6,52	19,57	B
Mixto con maní	0-5 cm	28	9,86	1,85	18,79	6,74	13,04	B C
Agrícola sin maní	0-5 cm	70	8,93	1,70	19,05	5,22	12,83	C D
Agrícola con maní	0-5 cm	85	8,68	1,61	18,52	3,26	11,96	D
Médano	0-5 cm	33	6,93	1,94	27,97	3,91	14,13	E
Natural	5-10 cm	35	9,35	1,97	21,01	4,13	12,61	A
Mixto sin maní	5-10 cm	32	8,8	2,54	28,86	5,65	15,22	A B
Agrícola sin maní	5-10 cm	70	8,08	1,81	22,39	4,35	14,78	B C
Agrícola con maní	5-10 cm	85	7,78	1,71	21,96	4,78	15,00	C
Mixto con maní	5-10 cm	28	7,27	1,58	21,74	4,13	10,22	C D
Médano	5-10 cm	33	6,52	2,11	32,36	2,61	12,39	D
Natural	10-20 cm	35	8,93	2,79	31,25	3,70	15,87	A

Mixto sin maní	10-20 cm	32	8,45	2,77	32,83	5,00	15,43	A
Mixto con maní	10-20 cm	28	7,31	1,39	19,09	5,33	10,76	B
Agrícola con maní	10-20 cm	85	7,26	1,62	22,26	4,57	16,52	B
Agrícola sin maní	10-20 cm	70	7,02	1,60	22,81	4,35	14,13	B
Médano	10-20 cm	33	5,93	1,20	20,23	3,48	8,04	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

En la capa de suelo de 0-5 cm de profundidad, los sistemas mixtos superaron en su CIC a los agrícolas, presentando los suelos bajo la condición Mx2 la CIC más alta, aunque por debajo de la situación que representa el mínimo deterioro. El Mx1 no fue diferente de A2, este hecho fue observado prácticamente para todos los demás indicadores, pero en esta oportunidad el impacto de los sistemas Mx1 sobre la CIC del suelo fue significativamente menor que el de A1.

Al no haber sido diferentes A1 y A2, no se observaron impactos de la presencia del cultivo de maní sobre la CIC.

Como era de esperar por la dependencia entre la CIC y el CO, estos resultados son consistentes con los hallados en el apartado en el que se analizó la fracción orgánica. Todos los usos agropecuarios fueron diferentes de las condiciones de referencia de máximo y mínimo deterioro hasta los 5 cm de profundidad.

De 5-10 cm, la condición de referencia N no fue diferente de Mx2, presentando ambos, del mismo modo que en la capa superficial, los mayores valores de CIC. Esto sugiere que, el impacto del sistema de producción a esta profundidad fue menor.

Por otra parte, de 5-10 cm, si bien Mx2 mostró una mayor CIC que A2, no fue significativamente diferente de este. No se observaron efectos de la inclusión del cultivo de maní. En esta oportunidad, Mx1 fue quien presentó los menores valores sin diferenciarse de A1, de todos modos, no llegaron al nivel de CIC del médano.

Finalmente, de 10-20 cm las situaciones N y Mx2 volvieron a situarse juntas mostrando los mayores valores de CIC. En una instancia intermedia se agruparon Mx1, A1 y A2, y, por último, la CIC de Md fue diferente y menor a todas las anteriores.

Estas variaciones podrían estar dadas por el impacto del uso del suelo sobre el contenido de materia orgánica, ya que el comportamiento de la variable CIC ante los usos y manejo del

suelo evaluados fue similar. Se realizó entonces un análisis de correlación entre estas dos variables, y se observó una correlación entre la CIC y el CO con un r-Pearson de 0,66 0-5 cm. Luego, para las dos profundidades subyacentes, el valor de r se reduce a 0,58. Esta relación lineal de la CIC con el CO de 0-20 cm se observa en la Figura 50.

Por otra parte, es interesante mencionar que se encontró una correlación negativa con la fracción erodable de 0-5 cm con un r: -0,45 (Figura 51). Y finalmente, se halló una correlación con la fracción arcilla 0,31 en superficie, 0,34 de 5-10cm y de 0,43 de 10-20cm (Figura 52). Para las tres profundidades mostró correlaciones negativas con la arena (r-Pearson: -0,45, -0,49 y -0, 49) (Figura 53). Es interesante destacar que la correlación de la CIC con el CO disminuye en profundidad cuando paralelamente aumenta su correlación con la fracción arcilla. Es decir, que a medida que el CO del suelo se pierda por el impacto del uso agropecuario no sustentable, la CIC será solo responsabilidad de la arcilla presente. Y esta última, no alcanza grandes valores en los suelos de la Pampa Medanosa.

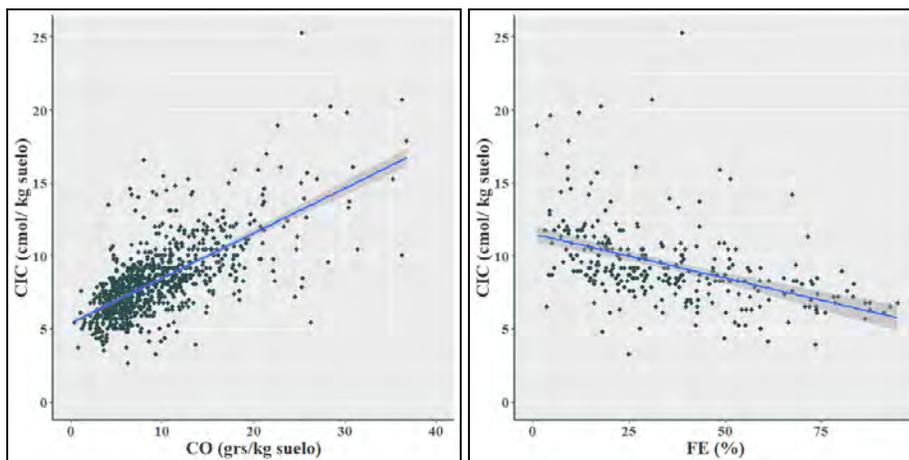


Figura 50 y Figura 51. Variación de la CIC (Cmol. kg^{-1}) de 0-20 cm en función del CO (g.kg^{-1}) (izquierda) y de la Fracción Erodable (%) (derecha).

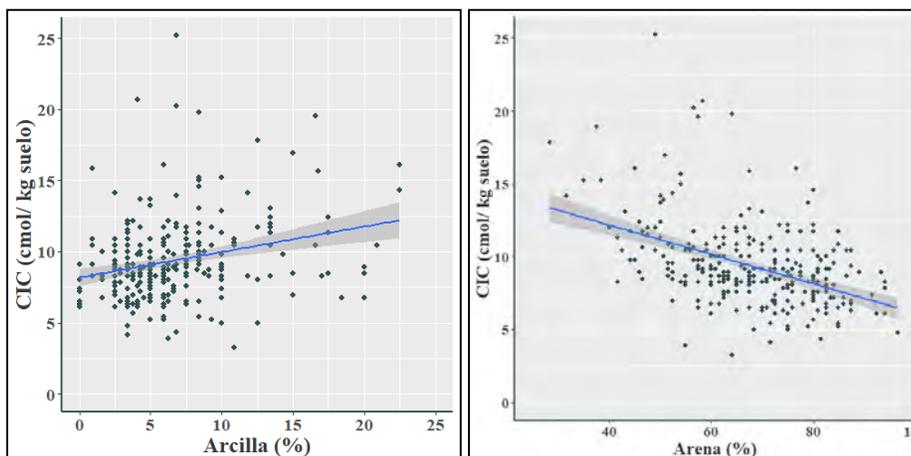


Figura 52 y Figura 53. Variación de la CIC (Cmol. kg^{-1}) de 0-20 cm en función de la Arcilla (%) (izquierda) y de la Arena (%) (derecha).

Se construyó un modelo lineal con tres variables que estima la CIC en la Pampa Medanosa, donde se aprecia con claridad la mayor influencia del componente orgánico en la determinación de la capacidad de intercambio catiónico. El modelo explicó solo el 52% de la variación de los datos por la gran dispersión de los valores en torno a las líneas de tendencia. Fueron probados otros modelos con menos variables, pero la ecuación a continuación presentó un P-valor menor a 0,0001 para cada una de los indicadores que la conforman y logró el mejor de los coeficientes de determinación ($R^2=0,52$).

Ec. 16

$$\text{CIC} = 7,994 + 1,474 * \text{MO}\% + 0,078 * \text{Arcilla}\% - 0,039 * \text{Arena}\%$$

3.8. Estado actual e impacto del uso y manejo sobre los contenidos de Calcio, Magnesio y Potasio en los suelos la Pampa Medanosa

En el presente caso de estudio, el uso y manejo del suelo explicó las variaciones encontradas en las concentraciones de Ca, Mg y K. Las muestras de suelo extraídas de sistemas de producción mixtos, con menor presión sobre el recurso suelo –Mx2- presentaron mayor disponibilidad de bases que aquellas extraídas de suelos agrícolas. Los efectos sobre suelos cultivados pudieron ser observados en las tres profundidades incluidas en el estudio con P-valores menores a 0,001 (Tabla 28).

En general, los coeficientes de variación fueron altos, cercanos o por encima de 30%, sin embargo, ello no evitó que se apreciaran diferencias estadísticas altamente significativas en la disponibilidad de las tres bases analizadas. En la capa superficial de 0-5 cm se observó que la mayor variabilidad se presentó en las situaciones de referencia, principalmente en las condiciones naturales; del mismo modo que para los demás indicadores. En esta profundidad de muestreo, los sistemas mixtos presentaron mayores coeficientes de variación que los sistemas agrícolas. De 5-10 cm, las situaciones de referencia mantuvieron su gran variabilidad, mientras que los sistemas agrícolas la incrementaron. Y, en la capa de 10-20 cm, todas las condiciones presentaron mayores coeficientes de variación.

Ron *et al.* (2011) realizaron un estudio comparativo entre suelos bajo agricultura y suelos prístinos en el SO de Buenos Aires cuyo material originario ha sido loess eólico franco a franco limoso, sin hallar diferencias para pH, Ca y Mg. Probablemente, en suelos de texturas más gruesas como los del presente estudio, el impacto del uso y manejo sobre las bases se perciba antes que en suelos más resilientes y mejor provistos químicamente.

Tabla 28. Contenidos medios de Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K) (Cmol. kg⁻¹), desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación en cada situación de uso y manejo evaluada en la Pampa medanosa a tres profundidades 0-5 cm, 5-10cm y 10-20cm.

Situaciones	Prof.	n	Ca	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	
Natural	0-5 cm	35	6,97	3,5	50,21	2,25	20,00	A
Mixto sin maní	0-5 cm	32	5,75	2,32	40,38	3,25	11,75	B
Mixto con maní	0-5 cm	28	4,99	1,42	28,42	2,50	7,75	B C
Agrícola con maní	0-5 cm	85	4,81	1,05	21,76	1,25	7,50	C
Agrícola sin maní	0-5 cm	70	4,74	1,32	27,83	1,75	8,75	C
Médano	0-5 cm	33	3,58	1,69	47,21	1,25	10,75	D
Situaciones	Prof.	n	Mg	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	
Natural	0-5 cm	35	1,94	0,89	45,66	0,00	4,75	A
Mixto sin maní	0-5 cm	32	1,91	0,93	48,82	0,75	4,75	A
Mixto con maní	0-5 cm	28	1,67	0,67	40,35	0,5	3,00	A B
Agrícola sin maní	0-5 cm	70	1,61	0,55	34,18	0,75	2,75	B
Agrícola con maní	0-5 cm	85	1,46	0,55	37,63	0,00	2,50	B C
Médano	0-5 cm	33	1,24	0,44	35,03	0,25	2,25	C
Situaciones	Prof.	n	K	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	
Mixto sin maní	0-5 cm	32	1,96	0,6	30,8	1,03	3,36	A
Mixto con maní	0-5 cm	28	1,72	0,47	27,5	0,77	2,69	B
Agrícola sin maní	0-5 cm	70	1,48	0,33	22,54	0,82	2,59	C
Agrícola con maní	0-5 cm	85	1,46	0,37	25,44	0,31	2,26	C
Natural	0-5 cm	35	1,45	0,55	37,89	0,41	2,46	C
Médano	0-5 cm	33	0,99	0,39	39,7	0,28	1,92	D
Situaciones	Prof.	n	Ca	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	
Mixto sin maní	5-10 cm	32	4,93	2,02	41,00	2,75	10,5	A
Natural	5-10 cm	35	4,93	1,64	33,28	1,75	8,75	A
Agrícola con maní	5-10 cm	85	4,21	1,05	25,01	2,50	8,75	B
Agrícola sin maní	5-10 cm	70	4,18	1,19	28,45	1,25	9,50	B
Mixto con maní	5-10 cm	28	3,81	1,23	32,35	1,75	6,25	B
Médano	5-10 cm	33	3,68	1,37	37,32	1,25	8,50	B
Situaciones	Prof.	n	Mg	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	

Natural	5-10 cm	35	1,52	0,66	43,18	0,5	3,75	A
Mixto sin maní	5-10 cm	32	1,48	0,58	38,96	0,25	2,75	A
Agrícola sin maní	5-10 cm	70	1,43	0,58	40,31	0,25	3,00	A
Agrícola con maní	5-10 cm	85	1,38	0,58	42,19	0,25	4,25	A
Mixto con maní	5-10 cm	28	1,11	0,44	39,56	0,50	2,00	B
Médano	5-10 cm	33	1,04	0,52	50,43	0,25	2,00	B
Situaciones	Prof.	n	K	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	
Mixto sin maní	5-10 cm	32	1,47	0,45	30,58	0,77	2,95	A
Mixto con maní	5-10 cm	28	1,34	0,4	30,16	0,62	2,44	A B
Natural	5-10 cm	35	1,29	0,58	44,75	0,56	2,62	A B C
Agrícola con maní	5-10 cm	85	1,19	0,30	24,88	0,59	1,92	B C
Agrícola sin maní	5-10 cm	70	1,17	0,27	23,47	0,64	1,90	C
Médano	5-10 cm	33	0,92	0,43	46,28	0,35	1,95	D
Situaciones	Prof.	n	Ca	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	
Mixto sin maní	10-20 cm	32	5,16	2,74	53,15	2,00	12,75	A
Natural	10-20 cm	35	4,74	2,08	43,94	1,25	10,25	A B
Agrícola con maní	10-20 cm	85	4,24	1,09	25,64	2,25	10,00	B C
Mixto con maní	10-20 cm	28	4,13	1,23	29,79	2,50	8,00	B C
Agrícola sin maní	10-20 cm	70	4,09	1,14	27,91	2,25	8,25	C
Médano	10-20 cm	33	3,20	0,82	25,54	1,75	5,00	D
Situaciones	Prof.	n	Mg	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	
Natural	10-20 cm	35	1,76	0,70	39,87	0,75	3,50	A
Mixto con maní	10-20 cm	28	1,39	0,66	47,47	0,25	3,25	B
Mixto sin maní	10-20 cm	32	1,31	0,52	39,60	0,25	2,25	B
Agrícola con maní	10-20 cm	85	1,25	0,51	40,47	0,25	3,5	B
Agrícola sin maní	10-20 cm	70	1,23	0,40	32,28	0,25	2,00	B
Médano	10-20 cm	33	1,18	0,52	43,70	0,25	2,25	B
Situaciones	Prof.	n	K	D.E.	C.V.%	Mín.	Máx.	
Natural	10-20 cm	35	1,27	0,37	28,99	0,44	2,08	A
Mixto sin maní	10-20 cm	32	1,14	0,35	30,47	0,56	1,87	A B
Mixto con maní	10-20 cm	28	1,07	0,41	38,13	0,51	1,97	B C
Agrícola con maní	10-20 cm	85	0,99	0,33	33,04	0,46	2,36	C D

Agrícola sin maní	10-20 cm	70	0,92	0,28	30,32	0,35	1,59	D
Médano	10-20 cm	33	0,86	0,39	45,59	0,49	2,10	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En el caso del Ca, la mayor diferenciación entre las condiciones de uso y manejo del suelo estudiadas, pudo apreciarse en la capa de 0-5 cm. En los sistemas Mx2 el Ca fue significativamente mayor que en el resto de los sistemas productivos, en las tres profundidades de muestreo. De 0-5 cm la concentración máxima de Ca fue aquella bajo vegetación natural ($6,97 \text{ Cmol.kg}^{-1}$), mientras que la mínima disponibilidad de Ca se presentó sobre médano - con una media de $3,58 \text{ Cmol.Kg}^{-1}$. Para esta profundidad en particular, Mx2 y Mx1 no fueron diferentes entre sí. El sistema Mx2 fue significativamente superior a las situaciones agrícolas, aun así, mostró una reducción del 20% relativa a N. Mx1, se situó en una posición intermedia, nuevamente, sin segregarse de A1 y A2; todas ellas con mermas del 30%, aproximadamente respecto a N.

De 5-10 cm, N y Mx2 fueron significativamente superiores al resto. A esta profundidad, Mx1, A2 y A1 no fueron diferentes del Md; presentado las situaciones agrícolas valores 15% inferiores a N. Para la profundidad 10-20 cm se observó el mismo comportamiento con valores un 20% inferiores a N.

A diferencia del Mg, el Ca, si fue diferente de la situación natural en la capa de 0-5 cm, en la que los sistemas mixtos Mx2 presentaron menores contenidos de Ca que la condición N. Esto que podría tener alguna relación con el hecho de que las especies leguminosas son generalmente más exigentes en Ca (Vázquez, 2012). Los requerimientos de Ca de alfalfa y soja son superiores a los de gramíneas como maíz. El requerimiento Ca para maíz de 3 kg.t^{-1} (IC-índice de cosecha- 0,07), mientras que para soja asciende a 16 kg.tn^{-1} (IC 0,19) (Vázquez y Millán, 2017). Alfalfa requiere 11-12,5 kg de Ca por cada tonelada de materia seca, aquí la diferencia radica en el IC. Sainz Rozas *et al.* (2014) menciona que, en el S de Córdoba, NO y centro de Buenos Aires, centro y S de Santa Fe, se han informado respuestas positivas al encalado en soja y alfalfa.

Respecto del Mg en la capa superficial, se observó que los suelos de la condición natural y los suelos bajo sistemas mixtos agrícola-ganaderos, presentaron mayores concentraciones de esta base que aquellos bajo agricultura. Mx1 se posicionó nuevamente en una instancia

intermedia y no se diferenció de A1 y A2, que presentaron pérdidas de esta base del orden del 20% y 15%, respectivamente. Mx2 solo perdió un 2%. Se observó que A1 no fue significativamente diferente de Md, aun cuando este último presentó un 35% menos de Mg que N. En la capa de 5-10 cm, solo Mx1 con una reducción del 27% fue igual a Md. De 10-20 cm, todas las situaciones estudiadas fueron significativamente inferiores a la situación de referencia N, y, al mismo tiempo, no se diferenciaron de Md, presentando los sistemas de producción mixtos reducciones de Mg del 24% respecto a la condición natural y los agrícolas del 29%.

El impacto del uso y manejo sobre la disponibilidad de Mg ha sido inferior al encontrado sobre el Ca. Probablemente ello se deba a que los requerimientos de Mg de los principales cultivos presentes en las rotaciones históricas de los suelos muestreados son menores que los requerimientos de Ca. Soja requiere alrededor de 9 kg. t^{-1} (IC 0,30), maíz 3 kg. t^{-1} (IC 0,30) y alfalfa $2-3,7 \text{ kg. t MS}^{-1}$ (Ciampitti y García, 2007a, 2007b). (Sainz Rozas *et al.*, 2014) reportó una disminución del 18% de Mg de 0-20 cm a causa de la agricultura, en promedio para toda la Región Pampeana.

En cuanto al K, en la capa superior, los sistemas mixtos fueron significativamente diferentes del resto y presentaron cantidades de K inclusive superiores a la situación natural (18-35% para Mx1 y Mx2, respectivamente). Probablemente, esto pueda ser explicado, debido al reciclado de esta base por las pasturas desde capas más profundas, y la vuelta al suelo a través de las heces y orina de los animales. A través del pastoreo, los animales participan directamente en el ciclo de nutrientes mediante el consumo y la ingesta de forraje, seguido de un periodo de inmovilización temporal de los nutrientes durante la digestión y el retorno de los nutrientes al suelo a través de las excreciones (Haynes y Williams, 1993). Si bien se sabe que, este nutriente no forma parte de estructuras orgánicas, es un importante macronutriente que actúa como cofactor enzimático y regulador osmótico (Azcón-Bieto y Talón, 2000), y, por lo tanto, su liberación a partir de residuos superficiales tiene poca dependencia de los procesos microbianos quedando fácilmente disponible nuevamente en el suelo (Assmann *et al.*, 2017). Wells y Dougherty (1997) han señalado que alrededor del 80% y 85% de P y K, respectivamente, pasan a través del animal y se excretan en la orina y las heces.

Jobbágy y Jackson (2001) han explicado que la mayor concentración del K en superficie por el ciclado que realizan las especies vegetales contribuyendo a la distribución vertical de los nutrientes, principalmente de aquellos que les son requeridos en mayor cantidad. Esta teoría explica también el hallazgo de una mayor concentración de los nutrientes, incluso aquellos más dependientes del material parental, en la capa de 0-5 cm, mostrando un proceso de estratificación de las bases en los suelos del sur de Córdoba. En consecuencia, los muestreos de suelos en esta región debieran planificarse estratificados.

Las situaciones A1 y A2 no fueron diferentes entre sí y tampoco de N, por lo que no se apreció ningún efecto del cultivo de maní sobre el K, así como tampoco de la agricultura en la capa de 0-5 cm. Todas las condiciones estudiadas fueron diferentes y superiores a la situación Md, la que expresó el menor valor.

Se destaca que, si bien A1 y A2 no se diferenciaron estadísticamente de N como en el caso del Ca y Mg en la capa superficial, si lo hicieron en las capas subyacentes. Lo que sugiere una reposición del K través del ciclado vegetal.

En capa de 5-10 cm, Mx2 mantiene su posición superior, sin diferenciarse completamente de las situaciones que tomaron una posición intermedia Mx1 y N. A1 y A2 que presentaron reducciones de aproximadamente un 10% relativas a N. Ninguna de las condiciones fue similar a la de Md, que exhibió el menor valor de K.

Finalmente, de 10-20 cm, se agruparon en el nivel superior N y Mx2. Ambas situaciones mixtas, Mx2 y Mx1, mostraron reducciones de un 10 y 15%, respectivamente. Los sistemas de producción mixtos fueron a esta profundidad significativamente superiores y diferentes de los agrícolas. A1 mostró una reducción del 22% relativa la condición de mínimo deterioro y A2 una reducción del 28%.

La gran mayoría de las investigaciones sobre la disponibilidad de bases del suelo a nivel nacional han sido desarrollados llevando adelante muestreos de suelo de 0-20 cm de profundidad.

Sainz Rozas *et al.* (2014) señalan una disminución promedio para toda la Región Pampeana del 23% del K, hasta los 20 cm de profundidad, mayor a las que los mismos autores reportaron para Ca y Mg, mencionando que ello podría ser consecuencia del mayor índice de cosecha de K del cultivo de soja y de la frecuente participación de la misma en las secuencias agrícolas de la región. Estos autores señalan además que la mayor pérdida de disponibilidad

ocurrió en los suelos arcillosos, a causa de la menor exploración del perfil por las raíces, observando menores pérdidas en el sur de Córdoba y atribuyéndolo a un mayor ciclado vertical consecuencia de una mejor exploración del perfil al encontrar las raíces menos impedancias mecánicas por ser suelos de texturas más gruesas. Losinno y Conti (2005) señalan un fuerte descenso en la concentración de K extractable que aún no se ha manifestado en una notoria deficiencia en el nivel crítico para los cultivos. Esta disminución del 40% de K fue identificada hasta los 20 cm de profundidad en suelos bajo agricultura continua en el NE de Buenos Aires sobre las series más productivas de la Pampa Ondulada. Las autoras hallaron un valor medio de $1,46 \text{ Cmol.kg}^{-1}$, de 0-20 cm, superior al nivel crítico mencionado por los autores de $0,4 - 0,6 \text{ Cmol.kg}^{-1}$.

Los valores de K encontrados en este estudio estuvieron por debajo del valor medio de $2,06 \text{ Cmol.kg}^{-1}$ reportado por Morrás y Cruzate (2001) para la Región Pampeana – incluyendo el área arenosa en su muestreo-. Para la región árida y semiárida argentina, Zubillaga (2012) señala que el contenido de K en minerales primarios es alto, siendo suelos ricos en K total, pero a menudo indisponible.

Es necesario destacar que, si bien estos suelos están bien provistos de este nutriente, que no hay fertilización potásica y que las arcillas predominantes son de tipo illíticas (Bécher Quinodóz y Blarasin, 2015), aun así, se observaron diferencias entre las situaciones agrícolas, las mixtas y la de referencia de mínima degradación. Esto sugiere que, luego de haberse establecido esta línea de base, debería continuarse investigando el comportamiento de este nutriente.

Por otra parte, aun cuando los CV% fueron altos, por ser este un estudio observacional con numerosos factores no controlados, el uso explicó variaciones en los contenidos de todas las bases. En este sentido, Correndo *et al.* (2012) han señalado disminución de los niveles de K del suelo debida a la introducción de la agricultura, mientras que, Cruzate y Casas (2012) mencionan sólo un 6% de reposición de K mediante fertilización a nivel nacional, señalando una mayor extracción de K en SO y SE de Córdoba, sur de Santa Fé y sur de Buenos Aires.

El comportamiento del K podría estar oficiando de indicador temprano del rumbo que tomaría la extracción de nutrientes sin reposición en suelos estos con bajos contenidos de arcillas y materia orgánica en cada uso estudiado, y que, además, la rotación con pasturas permanentes o semipermanentes para ganadería podría inducir mejoras en su disponibilidad.

Teniendo en cuenta que la reposición natural en suelos en los que la proporción de illitas y feldespatos potásicos es menor, como estos suelos de matrices más gruesas, probablemente sea también menor. Se debería profundizar el análisis micromorfométrico de las arcillas presentes en la región medanosa y en la capacidad reposición del K. Ya que, la fuente original de provisión de este nutriente son los minerales primarios, feldespatos (principalmente ortoclasas) y micas (muscovita y biotita). Por otro lado, el aporte de minerales secundarios proviene del K fijado en la doble capa de las illitas. Normalmente el K del complejo de cambio representa el 0,1-2% del total, es decir que su mayor proporción es estructural (Zubillaga, 2012).

Para complementar el análisis se observaron las correlaciones entre las bases, la fracción orgánica, la fracción A+L y la fracción erodable. Encontrándose, como era esperado, correlaciones positivas con CO y A+L, y negativas con FE% - y también con Arena %-.

El Ca mostró una correlación positiva con la CO (Figura 54) con r-Pearson 0,50.

En el caso del K la correlación con la CO fue muy cercana a la del Ca (r-Pearson 0,48) (Figura 55) mientras que la correlación del K con la A+L fue inferior (r-Pearson 0,31). El K presentó una correlación negativa con la fracción erodable r-Pearson: -0,47, mientras que Ca y Mg presentaron r- Pearson menores (-0,36 y -0,26, respectivamente), mostrando que aquellas situaciones incrementadas en agregados erosionables quedan empobrecidas en nutrientes (Iturri *et al.*, 2016).

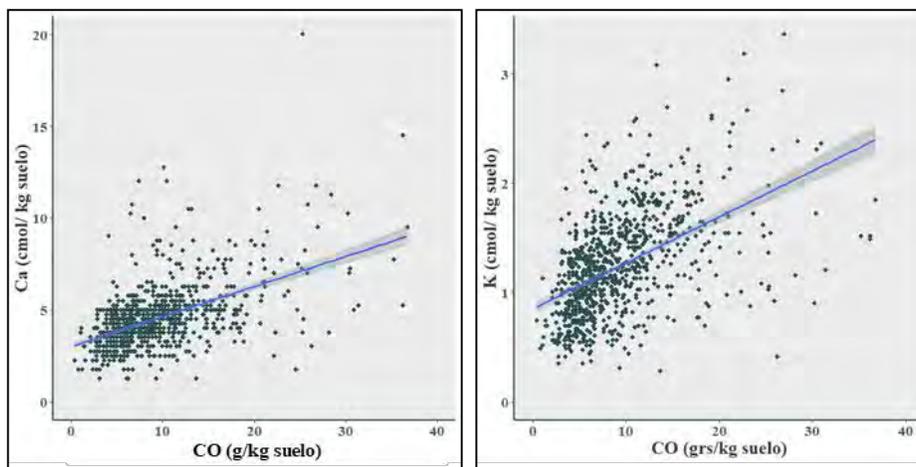


Figura 54 y Figura 55. Covariación de la concentración de Calcio (Cmol. kg^{-1}) (izquierda) y Potasio (Cmol. kg^{-1}) (derecha) en función del Carbono Orgánico (g. kg^{-1}).

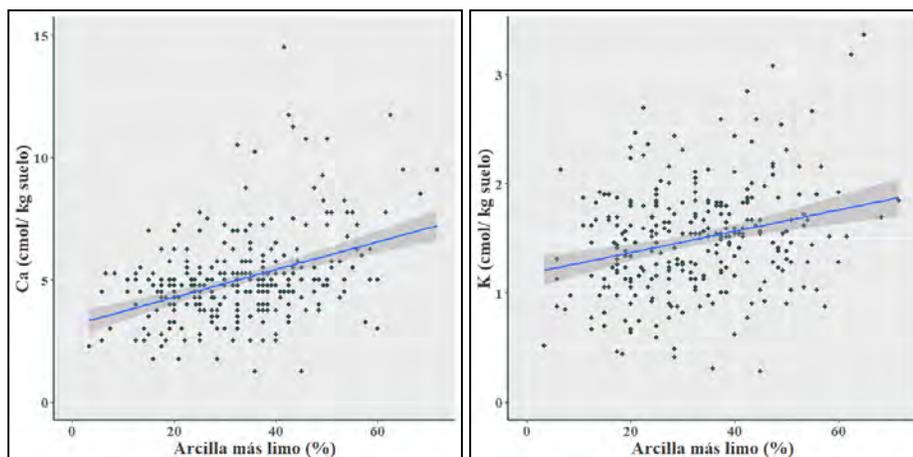


Figura 56 y Figura 57. Covariación de la concentración de Calcio ($\text{Cmol. Kg Suelo}^{-1}$) (izquierda) y Potasio ($\text{Cmol. Kg Suelo}^{-1}$) (derecha) en función de la fracción arcilla más limo (%).

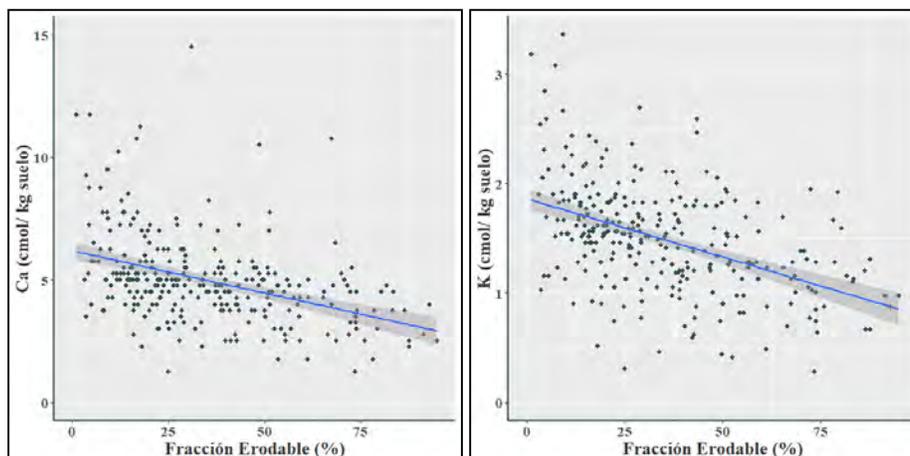


Figura 58 y Figura 59. Covariación de la concentración de Calcio (Cmol. kg^{-1}) (izquierda) y Potasio (Cmol. kg^{-1}) (derecha) en función de la fracción erodable (%).

Vázquez y Millán (2017) mencionan que el porcentaje de ocupación de la capacidad de intercambio catiónico por parte de las bases divalentes, Ca y Mg, debe ser próximo al 80% para que se manifieste una estructura adecuada en suelos donde las arcillas predominantes son del tipo 2:1. En el estudio, los valores de la suma de estos cationes expresados en porcentaje relativo a la CIC se mantuvieron dentro del rango de 70-75%, por debajo de lo recomendado por los autores mencionados. Los porcentajes de saturación del complejo de cambio para el Ca estuvieron entre 50 y 58% en todos los casos, por debajo de lo recomendado -65 a 85% - (Vázquez, 2012). Los valores medios de Mg estuvieron entre 16 y 20%, superando los valores normales para este catión -6 a 12%- . El K estuvo entre 14 y 18%, Sin embargo, no hay reportes de deficiencias de Ca ni de excesos de Mg en la región. Por otra parte, en los suelos argentinos el K ha recibido poca atención por la buena provisión de los suelos y las reservas suficientes (Zubillaga, 2012).

A modo de síntesis, se destaca que las variaciones en las concentraciones de bases se vieron afectadas por los usos y manejos estudiados. Esto ocurrió en mayor medida sobre la concentración de K, seguidamente en la de Ca y, por último, el Mg.

3.9. Estado actual e impactos del uso y manejo del suelo sobre el fósforo extractable en la Pampa Medanosa

El uso y manejo actual explicaron parte de las variaciones en el contenido de P extractable en la Pampa Medanosas. De todos los indicadores estudiados, el P extractable ha sido el que presentó la mayor variabilidad. Los coeficientes de variación fueron muy altos, aun cuando el número de muestras alcanzó un total de 283 sitios, demostrando la gran variabilidad interna que posee la región, que fue tratada hasta la actualidad como un ambiente homogéneo dentro de la provincia de Córdoba. Sumado a la variabilidad natural del P en la región dada por la deposición diferencial de su material originario y de cenizas volcánicas, se presenta la diversidad en el manejo. Esto se observó al encontrar suelos bajo agricultura que han arribado a valores de P tan bajos que no fueron detectados por la metodología empleada. Aun así, ante estos valores de CV el impacto del uso y manejo del suelo fue diferente entre las situaciones agropecuarias estudiadas.

Como se aprecia en la Tabla 29, el P presentó diferencias significativas para las diferentes profundidades estudiadas, por lo que los efectos del uso y manejo se vieron hasta los 20cm. La gran variabilidad presente en el contenido de P a diferentes capas en la porción superficial del perfil alerta sobre la necesidad de la ejecución de los muestreos en forma estratificada.

La situación natural (N) fue superior en concentración de P extractable a las demás situaciones lo que demuestra que todos los usos agropecuarios relevados indujeron una baja en el contenido de P extractable de los suelos del sur de Córdoba. En segundo lugar, se ubicaron los sistemas mixtos, con reducciones de entre 27 y 30% relativas a N. A2 actualmente presenta el 60% del contenido de P encontrado en N, mientras que A1 exhibió solo el 50% del P extractable relativo a N en la capa de 0-5 cm de suelo. Esta pérdida del nutriente se incrementa en profundidad donde A1 presenta el 27% de 5-10 cm y el 22% de 10-20 cm. Esto puede relacionarse, por un lado, con la fuerte estratificación de la materia orgánica ya que gran parte de este nutriente proviene ella, se observó que el P presentó una correlación positiva con la MO (r -Pearson: 0,56). Sainz Rozas *et al.* (2014) también observaron esta relación, para el horizonte superficial de un suelo franco, estos autores hallaron que la disminución de un 1% de MO implica la pérdida de 80 a 120 kg de P.

De 5-10 cm, ambos sistemas mixtos y A2 no fueron diferentes entre sí con valores de entre el 45 y 59% de P relativo a la situación de referencia de N, pero si lo fueron de A1 que

mostró una reducción del 73% relativa a N. La misma tendencia se observó en la capa de 10-20 cm. Las situaciones mixtas y A2 exhibieron valores de entre el 46 y 36% del P de referencia y A1 una reducción del 77%.

Tabla 29. Valores medios, desvío estándar (D.E.) y coeficiente de variación del contenido de fósforo extractable (P) (ppm) en cada situación de uso y manejo evaluada en la Pampa medanosa a tres profundidades 0-5 cm, 5-10cm y 10-20cm.

Situaciones	Prof.	n	P	D.E.	C.V.	Mín.	Máx.	
Natural	0-5 cm	35	32,61	13,88	42,57	10,01	69	A
Mixto con maní	0-5 cm	28	23,73	7,2	30,34	8,23	34,41	B
Mixto sin maní	0-5 cm	32	22,8	6,78	29,72	8,28	36,06	B C
Agrícola sin maní	0-5 cm	70	20,16	10,15	50,33	3,83	44,78	C
Agrícola con maní	0-5 cm	85	16,49	6,82	41,35	1,25	40,24	D
Natural	5-10 cm	35	21,17	14,72	69,53	0	66,55	A
Mixto con maní	5-10 cm	28	12,31	6,79	55,14	2,36	26,59	B
Mixto sin maní	5-10 cm	32	12,53	7,11	56,72	1,92	24,69	B
Agrícola sin maní	5-10 cm	70	9,55	6	62,86	0,94	28,97	B
Agrícola con maní	5-10 cm	85	5,76	4,61	80,06	0	19,77	C
Natural	10-20 cm	35	16,84	12,67	75,22	0	56,19	A
Mixto sin maní	10-20 cm	32	7,8	4,44	56,95	2,01	19,58	B
Mixto con maní	10-20 cm	28	6,2	4,55	73,43	1,11	17,77	B
Agrícola sin maní	10-20 cm	70	6,09	6,07	99,7	1,02	37,52	B
Agrícola con maní	10-20 cm	85	3,85	5,92	153,67	0,00	52,40	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Algunos autores han reportado importantes disminuciones del P en la Región Pampeana, la mayoría de ellos hasta los 20 cm de profundidad. Rozas *et al.* (2013) señalan una reducción del 44% de P.

Los valores medios encontrados para las situaciones agropecuarias estuvieron por encima de los niveles críticos de los principales cultivos regionales hasta los 10 cm de profundidad, de 10-20 cm el contenido de P disminuyó marcadamente. Para la región Pampeana los valores críticos de P para maíz y soja son 12,5 ppm, 14,3 ppm (Sucunza *et al.*, 2018), particularmente para el sur de Córdoba ha sido señalado para soja un nivel crítico de

13 ppm (Espósito *et al.*, 2008). Para la Pampa Arenosa, otros autores han empleado valores de 11 ppm para soja y 18 ppm para maíz (Barraco *et al.*, 2014). Todos ellos han sido determinados hasta los 20 cm de profundidad. Esto marca que los niveles de P del área medanosas del sur de Córdoba están próximos o por encima de los niveles críticos. Bongiovanni *et al.* (2010) encontraron un valor medio de P extractable de 18,4 ppm con un 45% de sus muestras superando los 20 ppm de 0-20 en un estudio regional realizado en el Dpto. General Roca.

Los cultivos toman el P desde la solución del suelo, este es repuesto a partir de formas de P lábiles. Al agotarse estas, las formas menos solubles provenientes de minerales primarios y secundarios, determinarán la concentración de P en solución. Por lo tanto, la disponibilidad es dependiente de la capacidad del suelo para sustituir los iones tomados por las plantas. Este proceso es muy lento -años- y está en función no solo de las características físico-químicas sino además de la actividad biológica (Suñer y Galantini, 2013). De aquí, la importancia de la reposición de este nutriente en los suelos de texturas gruesas con limitada capacidad buffer (Bongiovanni *et al.*, 2010).

Según Cruzate y Casas (2009) la reposición de nutrientes extraídos por los cultivos a nivel nacional es cercana al 34% causando la pérdida de calidad nutricional progresiva de los suelos. La mayor extracción de P ha sido señalada por los autores en Córdoba y Santa Fé, y los mayores valores de P exportado en los granos, al sur de Santa Fe y oeste de Córdoba, con valores superiores a los 18 kg/ha.

Suñer (2013), señala que tras varias décadas de agricultura el P exportado por los cultivos fue menor que el P disponible, que retornaba a través de la descomposición de la materia orgánica, generando un exceso de P_i originado durante la mineralización, el que precipitaba en forma de compuestos de baja solubilidad; esto sugiere un impacto significativo de la agricultura sobre la disponibilidad del P, no solo por extracción a través de las cosechas sino además por la alteración del equilibrio entre las diferentes formas.

Los resultados alertan que, si bien el P es un nutriente para el cual la región de estudio presenta valores altos, al igual que el K, en muchas oportunidades se incluye su reposición en la planificación de la fertilización. Los resultados muestran que su extracción está



ocasionando un balance con resultados negativos con impactos significativos sobre la calidad de los suelos de la Pampa Medanosa.

4. Conclusiones

1. La mayoría de los indicadores evaluados reflejan un deterioro en la calidad de los suelos mostrando sensibilidad a los usos agropecuarios estudiados en la Pampa Medanosa. Sugiriendo además que el uso actual de parte de los suelos de la región ejerce una alta presión sobre el recurso, sobrepasando las capacidades de su uso potencial.
2. Los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos bajo una menor presión de uso, sin cultivo de maní, han visto menos reducida la calidad de sus suelos en comparación a aquellos bajo usos agrícolas, mostrando los mayores valores de CO que sin embargo fueron 27% menores a los suelos bajo montes.
3. Los sistemas agrícolas con maní presentaron la mayor pérdida de carbono orgánico 55% en la capa superficial del suelo.
4. Aquellos sistemas de producción mixtos, pero con mayor presión de uso del suelo, con cultivo de maní, mostraron escasa distancia en cuanto al nivel de pérdida de calidad de suelos con los sistemas agrícolas puros sin maní, 43% y 49%, respectivamente.
5. Se observó además que las situaciones mixtas con menor presión de uso del suelo, sin cultivo de maní, tuvieron un mejor comportamiento de los indicadores físicos- fracción erodable, estabilidad estructural en seco. La mayor estabilidad y menor fracción erodable se encontró en sistemas mixtos sin maní.
6. Se encontró una fuerte relación entre FE y EES. La mayor degradación física se observó en suelos bajo agricultura con maní, con 71% EES y 33% de FE, sin embargo, la agricultura sin maní no fue diferente de aquella con maní estadísticamente.
7. Los suelos de sistemas mixtos con maní y agricultura sin maní no se diferenciaron en cuanto a degradación física.
8. La fracción erodable en los sistemas mixtos sin maní fue menor que en las situaciones naturales en un 10%.
9. Ambos sistemas bajo uso mixto presentaron los mayores porcentajes de macro agregados (19 mm) y los menores de microagregados (0,4 mm) en superficie, indicando una mayor calidad de suelo para la protección superficial frente a la erosión.

10. Los resultados indican que no es solo la inclusión del cultivo de maní en la rotación el único responsable de la degradación física identificada en los suelos con agricultura.
11. No se encontró una relación clara entre la aplicación del índice de estabilidad estructural de Pieri y los resultados obtenidos para la variable en laboratorio, previendo la necesidad de seguir investigando esta relación con datos locales.
12. Se encontró una fuerte relación entre CO y FE, lo que indicaría que el CO es uno de los indicadores del suelo a intervenir a través la planificación de las rotaciones para reducir la susceptibilidad a la erosión eólica.
13. Indirectamente los efectos sobre la fracción erodable se vieron reflejados sobre la CIC, Ca, Mg, K y P. Si bien algunas de estas variables también se relacionaron con la fracción A+L, no es una variable que se pueda modificar, y es, por lo tanto, la materia orgánica, aquel punto clave a atender en los suelos de la región. La correlación de la CIC con la MO disminuye en profundidad cuando paralelamente aumenta su correlación con la fracción arcilla. Es decir, que a medida que la MO se pierde, la CIC es solo responsabilidad de la arcilla presente. Y esta última, no alcanza grandes valores en los suelos de la Pampa Medanosa.
14. No se observaron efectos del uso y manejo del suelo sobre el pH, los valores encontrados no presentan dificultades para la producción de cultivos regionales.
15. Ambos sistemas mixtos superaron en su CIC a los agrícolas ($10,4 \text{ Cmol.kg}^{-1}$ y $8,8 \text{ Cmol.kg}^{-1}$, respectivamente, de 0-5 cm). Todos los usos fueron inferiores a la condición natural ($12,58 \text{ Cmol. kg}^{-1}$). No se observó efecto de la introducción del cultivo de maní sobre esta variable.
16. Se encontró correlación positiva de la CIC con el CO y negativa con la FE.
17. El uso y manejo del suelo explicó las variaciones encontradas en las concentraciones de Ca, Mg y K. El uso mixto sin cultivo de maní mostro mayor disponibilidad en las tres bases estudiadas a las tres profundidades incluidas en el análisis. La variación del Ca explicada por el uso ocurrió fundamentalmente en la capa de 0-5 cm. Presentando todos los usos contenidos significativamente menores de Ca que las condiciones de mínima degradación.
18. De todos los indicadores estudiados, el P extractable ha sido el que presentó la mayor variabilidad.

19. Los sistemas mixtos exhibieron reducciones en la concentración de fósforo extractable de entre 27 y 30% relativas a la situación de referencia de a mínima degradación. Mientras que los sistemas agrícolas sin y con maní presentaron reducciones del 50 y 60% respectivamente, para la capa de 0-5 cm.
20. La reducción del P en los sistemas agrícolas con maní se incrementa con la profundidad, mostrando pérdida de 73 % de 5-10 cm y 77% 10-20 cm. En esta situación de uso, el P mostro valores superiores al nivel crítico para los cultivos regionales solo en la capa de 0-5 cm.
21. Se observó la importancia del muestreo estratificado, que permitió apreciar la variabilidad que tienen los suelos del estudio dentro de un mismo horizonte.
22. Las situaciones con mayor susceptibilidad a erosión, evaluadas a través de la fracción erodable, la estabilidad estructural en seco y la materia orgánica, mostraron además las menores dotaciones de bases intercambiables y P, con lo cual se podría sugerir la existencia de procesos de retroalimentación entre indicadores biológicos (CO), físicos (FE-EES) y químicos (bases intercambiables y capacidad de intercambio catiónico).

Referencias bibliográficas

- Aguilera, S. (2000). Importancia de la protección de la materia orgánica en suelos. Simposio Proyecto Ley Protección de Suelo. Boletín núm. 14, 77-85 pp. Valdivia, Chile.
- Akaike, H. (1973). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. En: B. N. Petrov y F. Csaki (Eds.). Second International Symposium on Information Theory (pp. 267–281). Budapest: Akademiai Kiado.
- Allochis, H., y V. Quintana. (2017). Efecto del maní sobre las propiedades físicas y la erosión eólica en suelos de texturas contrastantes de la Región Semiárida Pampeana. Universidad Nacional de La Pampa, La Pampa, Argentina.
- Álvarez, C. R., y G. Rubio. (2012). Acidez: parámetros, efectos sobre los cultivos y manejos. En R. Álvarez, G. Rubio, C. R. Álvarez y R. Lavado (Eds.), Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana (2 ed., pp. 540). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Facultad de Agronomía-UBA.
- Alvarez, R., G. Berhongaray, J. De Paepe, M. R. Mendoza, H. S. Steinbach, C. Caride, y R. Cantet. (2012). Productividad, fertilidad y secuestro de carbono en suelos pampeanos: efecto del uso agrícola. Trabajo presentado en Anales de la Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria.
- Aoki, A. M., M. R. Ateca, y H. P. Apezteguía. (2014). Materia Orgánica y sustancias húmicas. Producción sustentable. Trabajo presentado en XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Argentina.
- Assmann, J. M., A. P. Martins, I. Anghinoni, L. G. de Oliveira Denardin, G. de Holanda Nichel, S. E. V. G. de Andrade Costa, . . . A. J. Franzluebbbers. (2017). Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities insubtropics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108(1), 21-33.
- Azcón-Bieto, J., y M. Talón. (2000). *Fundamentos de fisiología vegetal*: McGraw-Hill Interamericana.
- Barber, S. A. (1984). *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. New York: Wiley Interscience.

- Barraco, M., M. Díaz-Zorita, C. Justo, y A. Lardone. (2014). Fertilización fosfatada por suficiencia o mantenimiento en secuencias agrícolas de la Pampa Arenosa. *Fertilizar*, 29.
- Bayer, C., L. Martín-Neto, J. Mielniczuk, A. Pavinato, y J. Diekow. (2006). Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-tillage. *Soil Till.*, 86(2), 237-245.
- Bécher Quinodóz, F. N., y M. Blarasin. (2015). Evaluación de relaciones acuífero libre-lagunas mediante modelación hidrogeoquímica e isotópica en la planicie medanosa del sur de Córdoba-Argentina. *Serie correlación geológica*, 31(2), 0-0.
- Blair, G., R. Lefroy, y L. Lisle. (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems. *Aust. J. Agric. Res.*, 46, 1459-1466.
- Blair, N., R. D. Faulkner, A. R. Till, y P. R. Poulton. (2006). Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility. Part I: broadbalk experiment. *Soil Till Res.* 91: 30–38.
- Bongiovanni, M. D., R. Marzari, y M. Ron. (2010). Fósforo disponible en suelos agrícolas del sur de Córdoba y sudeste de San Luis. Trabajo presentado en XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Bravo, O. (2013). Factores y procesos pedogenéticos que regulan el almacenamiento de carbono orgánico en suelos de la Pampa Austral. Tesis de doctorado, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- Bray, R. H., y L. T. Kurtz. (1945). Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science*, 59(1), 39-46.
- Brejda, J. J., D. L. Karlen, J. L. Smith, y D. L. Allan. (2000a). Identification of regional soil quality factors and indicators II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2125-2135.
- Brejda, J. J., T. B. Moorman, D. L. Karlen, y T. H. Dao. (2000b). Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators I. Central and Southern High Plains Soil Science Society of America Journal, 64(6), 2115-2124. doi: 10.2136/sssaj2000.6462115x

- Buschiazzo, D. E. (2006). Management systems in southern South America, In: Peterson, G.A., Unger, P.W., Payne, W.A. (Eds.), *Dryland Agriculture*, 2nd ed. Agron. Monogr. N° 23. ASA, CSSA y SSSA, Madison, USA, pp. 395–425.
- Buschiazzo, D. E., y S. B. Aymar. (2003). Erosión eólica: procesos y predicción. En: Golber A.D. y A.G. Kin (Ed.). *Viento, Suelo y Plantas*. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina.
- Buschiazzo, D. E., A. R. Quiroga, y K. Stahr. (1991). Patterns of organic matter accumulation in soils of the semiarid Argentinian Pampas. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 154(6), 437-441.
- Canteros, M. G., C. A. Venialgo, y N. C. Gutierrez. (2003). La materia orgánica y sus fracciones en distintas series de suelos del sudoeste Chaqueño. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*, Universidad Nacional del Nordeste.
- Castellini, M., A. M. Stellacci, E. Barca, y M. Iovino. (2019). Application of Multivariate Analysis Techniques for Selecting Soil Physical Quality Indicators: A Case Study in Long-Term Field Experiments in Apulia (Southern Italy). *Soil Science Society of America Journal*, 83, 707-720. doi: 10.2136/sssaj2018.06.0223
- Chepil, W. S. (1962). A compact rotary sieve and the importance of dry sieving in physical soil analysis 1. *Soil Science Society of America Journal*, 26(1), 4-6.
- Ciampitti, I. A., y F. O. García. (2007a). Balance de nutrientes y requerimientos nutricionales, absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios: I. Cereales, oleaginosos e industriales. *Inf. Agron.* 33. Arch. Agron. 11. Int. Plant Nutr. Inst. South. Cone, Acassuso, Buenos Aires, Argentina.
- Ciampitti, I. A., y F. O. García. (2007b). Requerimientos nutricionales absorción y extracción de macronutrientes y nutrientes secundarios. II. Hortalizas, frutales y forrajeras. *Informaciones agronómicas del Cono Sur*, (37) 1-4.
- Clerici, C. M. (2008). Evaluación de la degradación de los suelos de la Pampa Medanosa causada por los cambios de uso actuales. Tesis de grado, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Colazo, J. C., y D. E. Buschiazzo. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159(1), 228-236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.016>

- Correndo, A., G. Rubio, I. A. Ciampitti, y F. O. García. (2012, 2011). Dinámica del Potasio en Molisoles de la Región Pampeana Norte. Trabajo presentado en XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina – 16 al 20 de abril de 2012.
- Cosentino, D., y F. Kraemer Bherens. (2017). Fertilidad física: Descripción, fertilidad y manejo. En M. Vázquez (Ed.), Manejo y Conservación de Suelos. Con especial énfasis en situaciones argentinas (pp. 386). La Plata, Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo -AACS-
- Cristeche, E., y J. A. Penna. (2008). Métodos de valoración económica de los servicios ambientales. Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales, 3, 1-55.
- Cruzate, G., y R. Casas. (2012). Extracción y balance de nutrientes en los suelos agrícolas de Argentina *Informaciones agronómicas de Hispanoamérica*. (Vol. 6, pp. 7-14). Acassuso, Buenos Aires, Argentina: IPNI Cono Sur.
- Cruzate, G. A., y R. Casas. (2009). Extracción de nutrientes en la agricultura argentina. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 44, 21-26. Buenos Aires, Argentina: IPNI Cono Sur.
- Day, P. R. (1965). Particle fractionation and particle-size analysis. En C. A. e. a. Black (Ed.), *Methods of soil analysis* (Vol. 1, pp. 545-567). Madison: American Society of Agronomy Inc.
- De Boodt, M., y L. De Leenheer. (1967). West European methods for soil structure determinations. Ghent: The St. Faculty. Agric. Sci. vol. 7, 60-62.
- de Dios Herrero, J. M., J. C. Colazo, y D. E. Buschiazzo. (2017). Fracción erosionable y distribución de agregados en seco en suelos de diferente granulometría. Trabajo presentado en III Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y II Taller Nacional de Cartografía Digital, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- de Oro, L. A., F. AVECILLA, A. L. Iturri, J. E. Panebianco, M. Medez, S. B. Aimar, y B. D. E. (2017). Erosión eólica y su control. En M. E. Vázquez (Ed.), Manejo y conservación de suelos: con especial énfasis en situaciones argentinas (pp. 386). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo -AACS.

- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C. W. Robledo. (2017). InfoStat (Version 2017). Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Doran, J. W., y T. B. Parkin. (1994). Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable environment, 1-21.
- Doran, J. W., M. Sarrantonio, y M. A. Liebig. (1996). Soil Health and Sustainability. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 56, pp. 1-54): Academic Press.
- Doran, J. W., y M. R. Zeiss. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied soil ecology*, 15(1), 3-11.
- Druille, M., M. Castiglioni, y J. M. Massobrio. (2013a). Fracción erosionable del suelo en el oeste Bonaerense bajo sistemas de uso de la tierra contrastantes. *Ciencia del suelo*, 31(1), 125-132.
- Druille, M., M. G. Castiglioni, y M. J. Massobrio. (2013b). Fracción erosionable del suelo en el oeste Bonaerense bajo sistemas de uso de la tierra contrastantes.
- Duchaufour, P. (1975). *Manual de edafología* (3 ed.). Barcelona, España.
- Duval, M. E., J. Galantini, J. M. Martinez, y J. O. Iglesias. (2016a). Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico.
- Duval, M. E., J. A. Galantini, J. O. Iglesias, S. Canelo, J. M. Martinez, y L. Wall. (2013). Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*, 131, 11-19.
- Duval, M. E., J. A. Galantini, J. Martínez, y J. O. Iglesias. (2016b). Comparación de índices de calidad de suelos agrícolas y naturales basados en el carbono orgánico. *Ciencia del suelo*, 34(2), 197-209.
- Duval, M. E., J. A. Galantini, J. M. Martinez, F. M. Lopez, y L. G. Wall. (2015). Evaluation of the physical quality of soils in the pampas region: effect of management practices. *Ciencias Agronómicas* (25), 33-43.
- Espósito, G. P., C. A. Castillo, G. R. Balboa, y R. G. Balboa. (2008). Nivel crítico de fosforo y azufre en suelos del sur de Córdoba para el cultivo de soja. Trabajo presentado en XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Semiárido: un desafío para la Ciencia Semiárido: un desafío para la Ciencia del Suelo 13 al 16 de mayo de 2008. Potrero de los Funes (SL), Argentina.

- Fernández, R., A. Quiroga, C. Álvarez, C. Lobartini, y E. Noellemeier. (2016). Valores umbrales de algunos indicadores de calidad de suelos en molisoles de la región semiárida pampeana. *Ciencia del suelo*, 34(2), 279-292.
- Franzuebbers, A. (2002). Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res* 66, 95-106.
- Fryrear, D. W., C. A. Krammes, D. L. Williamson, y T. M. Zobeck. (1994). Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of soil and water conservation*, 49(2), 183-188.
- Galantini, J., J. Iglesias, M. Landriscini, L. Suñer, y G. Minoldo. (2008). Calidad y dinámica de las fracciones orgánicas en sistemas naturales y cultivados. En: Estudio de las fracciones orgánicas en suelos de la Argentina. Edi UNS. Pag. 71-95.
- Galantini, J., y R. Rosell. (2006). Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 72-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.032>
- Galantini, J. A., y M. R. Landriscini. (2007). Equilibrio y dinámica de las fracciones orgánicas del suelo: Relación con la fertilidad del suelo y la sustentabilidad del sistema. En A. Thuar, F. Cassán y C. Olmedo (Eds.), *De la Biología del Suelo a la Agricultura* (pp. 229-245). Río Cuarto, Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Galantini, J. A., y L. Suñer. (2008). Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia*, 25(1).
- García, M. G., y M. E. Vázquez. (2012). Valoración económico-ecológica de la pérdida de nutrientes básicos de los suelos santafesinos. *Revibec: revista iberoamericana de economía ecológica*, 19, 29-41.
- Género, I. A. M. I., y J. C. Colazo. (2019). Cultivos de cobertura Post - Maní Una alternativa para mantener la sustentabilidad de los suelos en el territorio del sud oeste de Córdoba. Resultados 2017 (pp. 8): EEA INTA Villa Mercedes San Luis y AER INTA Huinca Renancó, Córdoba.
- Haynes, R. J., y P. H. Williams. (1993). Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Adv Agron* 49:119–199.

- Hepper, E. N., M. S. Larroulet, V. Belmonte, y A. M. Urioste. (2018). Propiedades edáficas de un suelo del caldenal pampeano en parches con diferente vegetación. *Semiárida*, 23(2).
- Hevia, G. G., D. E. Buschiazzo, E. N. Hepper, A. M. Urioste, y E. L. Antón. (2003). Organic matter in size fractions of soils of the semiarid Argentina. Effects of climate, soil texture and management. *Geoderma*, 116, 265-277.
- Iturri, A., F. AVECILLA, P. J., y D. Buschiazzo. (2016). Mecanismos de transporte de elementos en sedimentos erosionados por el viento en suelos agrícolas pampeanos. En: Actas del XXV Congreso Argentinos de la Ciencia Suelo. Ordenamiento Territorial: Un desafío para la Ciencia del Suelo. Río Cuarto, 27 de Junio 1 de Julio de 2016. Cholaky C. y J. Cisneros (Comp.) Edit Uni Río. 594p.
- Jobbágy, E. G., y R. B. Jackson. (2001). The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 53(1), 51-77.
- Krüger, H., S. Venanzi, y J. A. Galantini. (2004, 2004). Rotación y cambios en propiedades químicas de un Hapludol típico del sudoeste bonaerense bajo labranza. Trabajo presentado en XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná. Resumen.
- Larroulet, M. S., E. N. Hepper, M. P. Á. Redondo, V. Belmonte, y A. M. Urioste. (2016). The Caldenal ecosystem: Effects of a prescribed burning on soil chemical properties. *Arid Land Research and Management*, 30(1), 105-119.
- Larson, W. E., y F. J. Pierce. (1991). Conservation and enhancement of soil quality.
- Ley provincial N° 8936. (2001). Ley de la conservación y la prevención de degradación de los suelos: Publicada en el Boletín oficial núm.136. 23 de julio de 2001. Secretaría de Agricultura y Ganadería de la provincia de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Leys, J. F. (1999). Wind erosion on agricultural land. In: Goudie, A.S., Livingstone, I., Stokes, S. (Eds.), *Aeolian Environments, Sediments and Landforms*. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, pp. 143–166.
- López Fourcade, R. (2007). Evaluación de la degradación de los suelos en la Pampa Medanosa frente a los cambios de uso actuales Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- López Fourcade, R., R. Clérici, C. J.M., y C. Cholaky. (2008). Evaluación de la degradación de los suelos de la pampa medanosa frente a los cambios de uso actuales. Trabajo

- presentado en el XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis, Argentina
- López, M. V., J. M. de Dios Herrero, G. G. Hevia, R. Gracia, y D. E. Buschiazso. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma*, 139(3-4), 407-411.
- Losinno, B. N., y M. E. Conti. (2005). Evolución espacial y temporal de potasio en 30 años de agricultura continúa en el noreste de la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 26, 23-24.
- Lupi, A. M., y N. A. Mórtola. (2017). Los indicadores de calidad de suelo según referentes calificados. En M. G. Wilson (Ed.), Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina. Entre Ríos, Argentina: INTA.
- Magra, G., y A. Ausilio. (2004). Corrección de la acidez de los suelos.
- Marelli, H., J. Arce, P. Marelli, y B. Conde. (2017). Indicadores de sustentabilidad del suelo en diferentes áreas del centro-sur de la provincia de Córdoba. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 27-30. En [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/32E1D685128E27D8032581AD0068B7C2/\\$FILE/27.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/32E1D685128E27D8032581AD0068B7C2/$FILE/27.pdf).
- Martínez Rodríguez, M. E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario jurídico y económico escurialense* (38), 315-331.
- Morrás, H. J. M., y G. A. Cruzate. (2001, 2001). Origen y distribución del potasio en los suelos de la Región Pampeana.
- Nelson, D. W., y L. E. Sommers. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter. En A. Page, R. Miller y D. Keneey (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Chemical and Microbiological Properties. Part 2.* (2 ed.). Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America, Inc.
- Noellemeyer, E., A. R. Quiroga, y D. Estelrich. (2006). Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 65(1), 142-155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.07.007>
- Panebianco, J. E., y D. E. Buschiazso. (2008). Wind erosion predictions with the Wind Erosion Equation (WEQ) using different climatic factors. *Land Degrad. Dev.*, 19, 36-44.

- Parra, B. J., A. R. Becker, y M. P. Cantú. (2011). Condición física de suelos en diferentes sistemas de manejo agrícolas del centro sur de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 29(2), 241-251.
- Pellegrini, A., D. A. Ferro, D. Bennardi, C. Genazini, y M. Vázquez. (2016). Efecto de la acidificación edáfica sobre los aluminosilicatos en un suelo de la región pampeana. Trabajo presentado en XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Ordenamiento territorial. Un desafío para la ciencia del suelo. En Actas, Río Cuarto. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77149>
- Pezzini, M., J. M. Cisneros, y I. S. Moreno. (2010). Encalado en suelos del área manisera. efectos sobre el pH y la saturación con calcio. Trabajo presentado en Jornada Nacional de Maní. 25. 2010 09 16, 16 de septiembre de 2010, General Cabrera, Córdoba.
- Pieri, C. (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara: CIRAD-IRAT.
- Pieri, C. (1995). Long-term soil management experiments in semiarid Francophone Africa. Soil management: Experimental basis for sustainability and environmental quality, 225-266.
- Pinheiro, J., y D. Bates. (2004). *Mixed-Effects Models in S and SPLUS*. New York: Springer.
- Porta Casanellas, J., M. López Acevedo Reguerín, y C. Roquero De Laburu. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. España: Ediciones Mundi Prensa.
- Quiroga, A., A. Bono, y I. Frasier. (2012). Materia Orgánica. En Q. Alberto y B. Alfredo (Eds.), *Manual de fertilidad y evaluación de suelos*. La Pampa, Argentina: EEA INTA Anguil.
- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. En <https://www.R-project.org/>.
- Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators*, 75, 307-320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>

- Rojas, J. M., D. E. Buschiazzo, y O. E. Arce. (2013). Parametros edáficos relacionados con la erosión eólica en inceptisoles del Chaco. *Ciencia del suelo*, 31(1), 133-142.
- Ron, M. d. l. M., M. E. Mandolesi, C. Facchinetti, y R. Jürgen Kiessling. (2011). Efecto antrópico sobre la fertilidad química de un suelo en el sudoeste bonaerense. *Ciencia del suelo*, 29(2), 223-231.
- Rostagno, C. M., H. F. Del Valle, y D. Buschiazzo. (2004). La erosión eólica. Peligrosidad Geológica en Argentina. ASAGAI. 12 pp.
- Rozas, H. R. S., H. E. Echeverría, y H. P. Angelini. (2011). Niveles de carbono orgánico y ph en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana Argentina. *Revista Ciencia del Suelo*, 29, 29-37.
- Rozas, H. S., M. Eyherabide, H. E. Echeverría, P. Barbieri, H. Angelini, G. E. Larrea, . . . M. Barraco. (2013). ¿Cuál es el estado de la fertilidad de los suelos argentinos? Trabajo presentado en Simposio Fertilidad 2013. IPNI Cono Sur-Fertilizar, Int. Inst, Rosario, mayo, 2013.
- Rubio, G., y C. Álvarez. (2012). Fósforo: dinámica y evaluación en agroecosistemas. En R. Álvarez, G. Rubio, C. R. Álvarez y R. Lavado (Eds.), *Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana* (2 ed., pp. 540). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Facultad de Agronomía-UBA.
- SAMLA. (2004). Sistema de Apoyo Metodológico a Laboratorios de Análisis de Suelo, Agua, Vegetales y Enmiendas Orgánicas: SAGPYA, ACCS.
- Sainz Rozas, H. R., H. E. Echeverría, P. A. Barbieri, y M. Eyherabide. (2014). Relevamiento y Mapeo de la fertilidad en suelos agrícolas de la región Pampeana Argentina. *Fertilizar*, 29.
- Schmidt, y Amiotti. (2016). Indicadores de calidad edáfica bajo sistemas de agricultura conservacionista en la Región Pampeana Semiárida sur. Trabajo presentado en XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo “Ordenamiento Territorial: un desafío para la Ciencia del Suelo”. 27 de junio - 01 de julio de 2016 Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, 6(2), 461-464.

- Shukla, M. K., R. Lal, y M. Ebinger. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194-204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
- Skidmore, E. L., W. A. Carstenson, y E. E. Banbury. (1975). Soil Changes Resulting from Cropping 1. *Soil Science Society of America Journal*, 39(5), 964-967.
- Skidmore, E. L., L. J. Hagen, D. V. Armbrust, A. A. Durar, D. W. Fryrear, K. N. Potter, . . . T. M. Zobeck. (1994). Methods for investigating basic processes and conditions affecting wind erosion. *Soil erosion Research methods*, 295-330.
- Skidmore, E. L., y J. B. Layton. (1992). Dry-soil aggregate stability as influenced by selected soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2), 557-561.
- Studdert, G., y H. Echeverría. (1998). Rotaciones agrícolas y dinámica del carbono orgánico del suelo en Balcarce. Presentado al XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Carlos Paz (Córdoba). 4 – 7 de mayo de 1998.
- Studdert, G. A., y H. E. Echeverría. (2002). Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. Presentado al XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn (Chubut). 16-19. Abril 2002.
- Sucunza, F. A., F. H. G. Boem, F. O. García, M. Boxler, y G. Rubio. (2018). Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *European Journal of Agronomy*, 96, 87-95.
- Suñer, L., y J. Galantini. (2013). El fósforo en agroecosistemas de Argentina: Implicancias para la producción sustentable. Boletín Electrónico CERZOS, 23. En <http://www.boletin.cerzos-conicet.gob.ar/index.php/articulos/el-fosforo-en-agroecosistemas-de-argentina>
- Taboada, M. A. (2012). Introducción, textura y estructura. En R. Álvarez, G. Rubio, C. R. Álvarez y R. Lavado (Eds.), *Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana. Sección 2. Limitantes físicas del suelo para los cultivos* (pp. 540). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Facultad de Agronomía-UBA.
- Tatarko, J. (2001). Soil aggregation and wind erosion: processes and measurements *Annals of Arid Z.* 40, 251-263.

- Toledo, D., J. A. Galantini, E. Ferreccio, S. Arzuaga, L. Gimenez, y S. Vázquez. (2013). Indicadores e índices de calidad en suelos rojos bajo sistemas naturales y cultivados. *Ciencia del suelo*, 31.
- Uberto, M. E., J. M. Cisneros, C. Vignolo, C. G. Cholaky, y R. R. Pedelini. (2002). Efecto de rotaciones y labranzas sobre la materia orgánica de un suelo típico del área núcleo manisera. Jornada Nacional de Maní. 17. 2002 09 19, 19 de setiembre de 2002. General Cabrera, Córdoba. AR.
- Urricariet, S., y R. S. Lavado. (1999). Indicadores de deterioro en suelos de La Pampa ondulada. *Ciencia del suelo*, 17(1): 37-44.
- USDA-NRCS. (2002). National Agronomic Manual (3 ed.). Washintong DC.
- Van Veen, J. A., y P. J. Kuikman. (1990). Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms. *Biogeochemistry* 11: 213-233.
- Vázquez, M. (2012). Calcio y magnesio. Su dinámica, diagnóstico y requerimientos de fertilización. En R. Álvarez, G. Rubio, C. R. Álvarez y R. Lavado (Eds.), Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana (2 ed., pp. 540). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Facultad de Agronomía-UBA.
- Vázquez, M. E., y G. J. Millán. (2017). Acidez del suelo: Origen, diagnóstico, consecuencias y tratamiento. En M. E. Vázquez (Ed.), Manejo y Conservación de Suelos. Con especial énfasis en situaciones argentinas (1 ed., pp. 386). La Plata, Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo -AACS-.
- Vázquez, M. E., A. E. Pellegrini, y G. Diosma. (2001). Efecto de la vegetación y tamaño de los agregados sobre formas orgánicas del suelo. *Agricultura Técnica*, 61(1), 61-69.
- Verma, S., y P. K. Sharma. (2007). Effect of long-term manuring and fertilizer on carbon pools, soil structure, and sustainability under different cropping systems in wet-temperate zone of northwest Himalayas. *Biol Fertil Soils* 19: 235–240.
- Wells, K. L., y C. T. Dougherty. (1997). Soil Management for Intensive Grazing. *Soil Science News and Views*, 18(2), s. p. Recuperado de <http://www.uky.edu/Ag/Agronomy/Extension/ssnv/ssv1182.htm>
- Woodruff, N. P., y F. H. Siddoway. (1965). A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29 (5), 602-608.



Zilio, J. P., H. R. Krüger, y F. D. Frolla. (2016). Indicadores de calidad de suelo en el sudoeste bonaerense.

Zubillaga, M. d. I. M. (2012). Potasio en los suelos agrícolas y requerimientos de fertilización. En R. Álvarez, G. Rubio, C. R. Álvarez y R. Lavado (Eds.), *Fertilidad de suelos. Caracterización y manejo en la Región Pampeana* (2 ed., pp. 540). Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Facultad de Agronomía-UBA.



CAPÍTULO VI

ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LA SENSIBILIDAD DE INDICADORES DE CALIDAD DE SUELO AL CAMBIO DE USO EN LA PAMPA MEDANOSA. PROPUESTA DE UN INDICE DE FÁCIL APLICABILIDAD

1. Introducción

En el capítulo precedente, se observó que existen efectos del uso del suelo sobre algunos atributos del mismo, que impactan negativamente sobre su calidad. Pero, a simple vista, no es posible determinar cuál de ellos ha expresado mayores variaciones en respuesta a la historia de uso agropecuario del suelo.

La calidad del suelo, desde una perspectiva agronómica, es la capacidad que tiene el mismo para funcionar, tanto en el tiempo presente como en el futuro (Doran y Parkin, 1994). Calidad implica la propia competencia para brindar funciones ecosistémicas (Doran y Parkin, 1994; Parr y Papendick, 1997; Lal, 2009; Bouma, 2015). Pesek (1994) y Doran *et al.* (1996) sostienen que, las soluciones tecnológicas y la expansión agrícola, fueron adoptadas rápidamente sin vaticinar sus posibles impactos ambientales; reflejando la incompleta comprensión del funcionamiento de los agroecosistemas.

El suelo es proveedor de numerosos servicios ecosistémicos al mismo tiempo, es por ello que de Paul Obade y Lal (2016) han considerado insuficiente inferir sobre su calidad únicamente a través de alguna de sus propiedades y en modo aislado. Numerosos autores han propuesto la selección de una cantidad mínima de indicadores, afirmando que no existe un set universal, sino que este estará en función del ambiente al que pertenezcan (Brejda *et al.*, 2000b; Cruz *et al.*, 2004; Cantú *et al.*, 2007; Raiesi y Kabiri, 2016; Raiesi, 2017).

El objetivo del capítulo fue identificar un set mínimo de indicadores de calidad de suelo con aquellos atributos de mayor sensibilidad al impacto del cambio de uso del suelo en la Pampa Medanosa, para luego construir con ellos un índice capaz de reflejar el principal proceso de degradación; estableciendo valores de referencia del máximo y el mínimo deterioro ambiental.

Existen antecedentes de índices de calidad de suelos construidos para el sur de la provincia de Córdoba. Cantero *et al.* (1986) diseñaron el VIART (Valor Indicativo de Aptitud Relativa de la Tierra) para el departamento Río Cuarto, conformado por un gran número de variables indicadoras. Su estructura es de carácter multiplicativo y aditivo. Este, no implementa la normalización de datos ya que utiliza escalas de valoración porcentuales. Por

otro lado, Cantú *et al.* (2007), propusieron un índice cuantitativo realizado para Molisoles de moderado desarrollo de una cuenca pedemontana del SO de la provincia de Córdoba. De estructura multiplicativa, implementando la normalización de los datos y seleccionando a su criterio las variables indicadoras de su composición en función de su facilidad de medición y de las características del ambiente. Un tercer grupo de autores, Campitelli *et al.* (2010), propusieron para el centro de Córdoba, la selección de variables indicadoras a través de un análisis de componentes principales (ACP) en el que los indicadores más sensibles se observan ante la maximización de la variabilidad total existente.

En el presente trabajo se efectúa la selección de un set de indicadores de un modo similar al llevado adelante por Campitelli *et al.* (2010), pero a través de una técnica estadística multivariada diferente. Se empleó un análisis discriminante canónico (ADC), con el que se logra detectar aquellas variables sensibles únicamente al uso y manejo de tierras, y se descarta la proporción de la variabilidad que pudiera estar inducida por otras causas. Se normalizan los datos de cada variable entre cero y uno como lo propone Cantú *et al.* (2007) pero empleando una función representativa del comportamiento de cada variable indicadora en el sistema suelo como lo propone Raiesi (2017). Y finalmente, se constituye con las variables seleccionadas un índice aditivo y multiplicativo para disminuir el error como lo destacó Cantero *et al.* (1986).

2. Materiales y métodos

2.1. Identificación de variables indicadoras sensibles al cambio uso del suelo

Para efectuar la selección de los indicadores y construir con ellos un índice, se empleó un análisis discriminante canónico (ADC) (Brejda *et al.*, 2000b). Los atributos de suelo empleados para el análisis fueron carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), calcio intercambiable (Ca), magnesio intercambiable (Mg), potasio intercambiable (K), fracción erodable (FE), fracción arcilla más limo (ArcLi), pH, y fósforo extractable (P); y sus determinaciones analíticas fueron detallados en el Capítulo V. Se emplearon datos analíticos de la capa superficial de 0 a 5 cm.

Para proceder al análisis de la sensibilidad de los atributos de suelo al uso, fueron comparados en el ADC cinco condiciones de uso del suelo descritas en el Capítulo V: situación agrícola con cultivo de maní (A1), situación agrícola sin cultivo de maní (A2), situación agrícola ganadera mixta con cultivo de maní (Mx1), situación mixta agrícola ganadera sin cultivo de maní (Mx2) y una situación referente de una condición cuasi natural (N).

La utilización del ADC posibilita maximizar la variabilidad existente entre las situaciones de usos de la tierra descritas anteriormente obteniéndose variables de síntesis o factores, que describen algebraicamente, mediante combinaciones lineales, las relaciones entre los grupos de observaciones y las variables responsables de su agrupamiento.

La matriz de varianza-covarianza resultante del ADC, da lugar a los autovalores. Estos son indicadores porcentuales de la variabilidad explicada por los factores generados. Su importancia radica en que permiten conocer con cuantos ejes canónicos es necesario trabajar (Balzarini *et al.*, 2015). Los autovectores, en cambio, son coeficientes ponderadores generados para construir cada combinación lineal o función canónica. Representan la responsabilidad que tiene cada indicador evaluado en la variabilidad existente entre los grupos estudiados. Y, por lo tanto, exponen la sensibilidad del indicador a la condición de uso. Estos coeficientes, se emplearon en la reducción del número de variables. Para variables retenidas dentro de un mismo factor multivariado, se efectuó un análisis de correlación lineal a fin de decidir si los indicadores podrían considerarse excedentes y evitar la sobre estimación de valores (Brejda *et al.*, 2000b; Andrews y Carroll, 2001; Vasu *et al.*, 2016; Raiesi, 2017).

Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2017).

2.2. Normalización de variables indicadoras

Con el objetivo de que los valores de los indicadores seleccionados sean comparables e integrables en un único índice, fue necesario crear funciones de normalización para independizarlos de sus unidades de medida, dándoles valores entre cero y uno, con un criterio de valoración a más es mejor, es decir que, un valor uno indicaría un valor óptimo. Para la identificación de la función en cada caso, fue necesaria la comprensión del comportamiento de la variable dentro del suelo. Se utilizaron funciones lineales y no lineales; de comportamiento “*más es mejor*” y “*menos es mejor*”.

La función a *más es mejor*; implica que al aumentar el nivel del indicador también lo hace la calidad del suelo. Por el contrario, la función *menos es mejor*, se utilizó para indicadores cuyo incremento afecta negativamente la calidad del suelo. Luego de asignar el tipo de curva adecuado a cada indicador seleccionado, fueron definidos los parámetros correspondientes a cada función de normalización (Armenise *et al.*, 2013).

2.3. Integración de un set mínimo de indicadores en un índice de fácil aplicabilidad

La integración implicó la combinación de los indicadores individuales normalizados dentro de un solo índice. Los autovectores o coeficientes canónicos estandarizados provenientes del ADC, fueron utilizados para atribuir un peso distintivo a cada variable componente del índice (Andrews *et al.*, 2002; Andrews *et al.*, 2004; Balzarini *et al.*, 2015; Raiesi, 2017). Los ponderadores fueron normalizados a uno con la finalidad de darle al índice una expresión porcentual, según:

Ec. 17

$$I = \sum_{i=1}^n [C_i * Var_i] * 100$$

donde C_i y Var_i son el coeficiente de ponderación y el valor normalizado del indicador i -ésimo, respectivamente.

El índice integrador (I) expresa porcentualmente el estado actual del funcionalismo del suelo en función de los indicadores que lo compongan (Andrews *et al.*, 2004).

Los valores del índice obtenidos para cada condición de uso y manejo de la tierra fueron sometidos a un análisis de la varianza con la finalidad de observar la existencia de diferencias estadísticamente significativas. Se realizó una prueba LSD de Fisher con un nivel de significancia $\alpha=0,05$, mediante el software estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2017).

3. Resultados y discusión

3.1. Exploración de la sensibilidad de indicadores de calidad al cambio de uso del suelo

La utilización del análisis discriminante canónico (ADC) permitió identificar aquellos indicadores con mayor sensibilidad a los cambios en su uso y manejo a través de la visualización de la contribución relativa de estos a la segregación de los usos del suelo en el espacio discriminante.

Las dos primeras funciones discriminantes canónicas obtenidas explicaron el 95,87% de la variabilidad entre situaciones de uso y manejo del suelo. Es decir que, en el plano discriminante constituido por estos dos ejes, se observó más del 95% de la variabilidad entre las situaciones de estudio. Se efectuó, por lo tanto, la selección de las variables entre aquellas retenidas por estas dos funciones, sin necesidad de incluir un tercer eje.

En la Figura 60, puede observarse que las situaciones de referentes de la condición de mínimo deterioro (N) presentan una marcada diferencia en el contenido de carbono orgánico (CO) de la capa superficial respecto de las demás situaciones, que expresan a través de su posicionamiento hacia la izquierda en el espacio discriminante, una clara pérdida de CO. Aun cuando la variabilidad de este atributo fue la mayor, logró uno de los ponderadores más altos sobre el eje canónico 1. El mismo comportamiento presentaron la CIC y el P, dos variables que al igual que el CO mostraron sus mayores ponderadores sobre el eje canónico 1 (Tabla 30).

Por otra parte, al observarse los desplazamientos de las elipses de predicción sobre el eje canónico 2, se aprecia que la separación entre ambos usos agrícolas y ambos usos mixtos está dada principalmente por dos variables: la fracción erodable y el contenido de potasio (K). Las situaciones bajo agricultura se asocian a un incremento en la fracción erodable (FE). Particularmente el análisis permite visualizar mayor contenido de CO y menor FE en A2.

El pH, calcio (Ca), magnesio (Mg) y acilla más limo (ArcLi), no muestran ponderadores altos. Sin embargo, de la distribución de las variables en el espacio discriminante puede obtenerse su correlación que contribuye al análisis de su comportamiento.

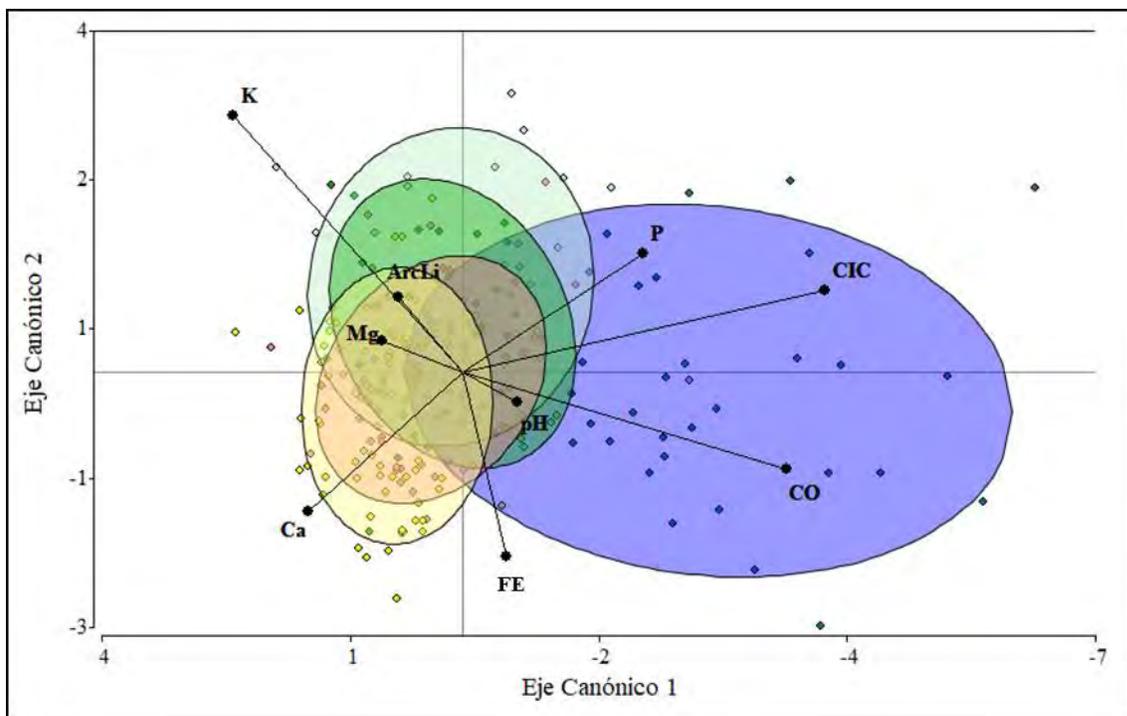


Figura 60. Contribución relativa de las variables analizadas a la discriminación entre las situaciones de uso del suelo observadas (puntos -referencias de color ídem elipses de predicción). Elipses de predicción: en color amarillo situaciones de producción agrícola con maní; en anaranjado situaciones de uso agrícola sin cultivo de maní; en verde oscuro situaciones de producción mixta agrícola-ganadera con maní; en verde claro uso mixto agrícola-ganadero sin cultivo de maní y en azul situaciones naturales. Variables: carbono orgánico (CO); fósforo extractable (P); fracción erodible (FE); pH; arcilla más limo (ArLi); capacidad de intercambio catiónico (CIC); calcio (Ca); magnesio (Mg); potasio (K).

Tabla 30. Contribución relativa de los indicadores de calidad a la variabilidad entre usos del suelo representada por las dos funciones que definen el espacio discriminante (coeficientes canónicos estandarizados).

<i>Funciones discriminantes</i>	1	2
Capacidad de intercambio catiónico	<u>-0,88</u>	0,21
Carbono orgánico	<u>-0,79</u>	-0,25
Arcilla más limo	0,16	0,19
Fracción erodable	-0,11	<u>-0,47</u>
Fósforo extractable	-0,44	0,30
pH	-0,13	-0,08
Potasio	0,56	<u>0,66</u>
Calcio	0,38	-0,36
Magnesio	0,20	0,08

En la primer función la CIC fue el indicador que expresó la mayor sensibilidad, evidenciado por su alto coeficiente canónico estandarizado (Tabla 30), lo que probablemente se asocie al CO cuya correlación fue positiva ($r = 0,66$). Variaciones en el CO implicarán variaciones en el valor de CIC. La mayor parte de la variación en la CIC reponde al CO, una porción menor se explica por la fracción ArLi ($r = 0,41$). Por ello, presenta correlación negativa con la fracción erodable ($r = -0,41$). La variación sobre la CIC el conllevará a variaciones en los macronutrientes Ca, K y Mg. La correlación entre la CIC y estas tres variables fue positiva ($r = 0,88, 0,48$ y $0,54$ para Ca, K y Mg, respectivamente).

El CO mostró el segundo coeficiente canónico estandarizado más alto, esto significa que ha sido la segunda variable con mayor sensibilidad al uso del suelo, luego de la CIC, sin diferenciarse en más del 10% entre ellas. Algunos autores, mencionan que, para la selección de indicadores, el hecho de que dos variables no se diferencien entre sí en más de un 10% implica que ambas variables son de importancia para la constitución de un índice; siempre y cuando estas dos variables no presenten correlación (Raiesi, 2017).

El P, al igual que la CIC, mostró una correlación positiva con el CO ($r = 0,41$) que se observó a través del desplazamiento de las dos variables en igual sentido sobre el espacio discriminante. Sin embargo, la contribución del P a la separación de usos fue menor. Se observó que fue superior en situaciones naturales respecto a situaciones con uso agropecuario, sin embargo, la contribución a la segregación no superó la mostrada por el CO

y por la CIC. Esto podía ser explicado por el alto contenido de P disponible presente en el material de origen de estos suelos (Bongiovanni *et al.*, 2010), que podría estar induciendo que su sensibilidad a los cambios de uso sea menor a diferencia de lo hallado Campitelli *et al.* (2010), quienes identificaron una mayor sensibilidad del P al uso del suelo en el centro de la provincia de Córdoba.

En la segunda función discriminante, las variables K y FE fueron las que presentaron los mayores coeficientes canónicos (Tabla 30), mostrando además una correlación negativa ($r = -0,43$), que se denota por su posicionamiento en sentido opuesto sobre el espacio discriminante graficado en el biplot de la Figura 60. La FE es la representante de una de las mayores problemáticas de degradación de los suelos en la Pampa Medanosa: la erosión eólica. Esta variable ha sido empleada en la estimación de la susceptibilidad del suelo a la erosión eólica a través de modelos de simulación como la Ecuación de la Erosión Eólica (EWEQ) adaptada para la Región Pampeana Semiárida Argentina por Panebianco y Buschiazzo (2008). Numerosos autores han encontrado que el uso del suelo afecta la proporción de FE presente en los suelos comparando contemporáneamente diferentes usos y sistemas de labranza (Hevia *et al.*, 2007; Colazo y Buschiazzo, 2010; Druille *et al.*, 2013). Los autores de Dios Herrero *et al.* (2017) establecen la comparación entre agricultura bajo siembra directa y una situación natural, llegando a la misma conclusión que los anteriores. El presente estudio compara tanto usos agropecuarios bajo siembra directa como situaciones no disturbadas; permitiendo de este modo percibir que la FE es sensible al uso del suelo independientemente del sistema de labranza empleado.

El hecho de que el K haya resultado ser un indicador sensible al uso de la tierra en la región de estudio sugiere que, si bien es conocida la riqueza en K de los sedimentos eólicos cuaternarios depositados en el centro del país durante las glaciaciones por su contenido de arcillas illíticas (Bécher Quinodóz y Blarasin, 2015), es probable que, en la zona de estudio, dada su mayor proporción de fracciones gruesas y a la menor cantidad de arcillas, la capacidad buffer del suelo en cuanto a la reposición de K sea menor, convirtiéndolo en un indicador sensible a los cambios de uso de la tierra. Álvarez *et al.* (2020) tras llevar adelante un metanálisis, mencionaron que el K es la única de las bases que presentó un balance negativo, y sugieren que ello se debe a la extracción de la base por la agricultura.

Los atributos que han mostrado mayor sensibilidad al cambio de uso del suelo en la Pampa medanosa han sido finalmente CIC, CO, K y FE. Variables pertenecientes a un mismo eje mostraron correlación. Por lo tanto, de todas ellos, para la constitución del índice, se optó por CO y FE.

En el caso del CO, se eligió esta variable en lugar de la CIC ya que numerosos autores coinciden en que el CO es el principal indicador capaz de reflejar la calidad de un suelo y su productividad (Brejda *et al.*, 2000a; Brejda *et al.*, 2000b; Galantini y Rosell, 2006; Noellemeyer *et al.*, 2006; Duval *et al.*, 2013). Aunque no en todos los casos muestra el ponderador más alto (Brejda *et al.*, 2000a; Shukla *et al.*, 2006; Campitelli *et al.*, 2010; Raiesi, 2017). Por otra parte, es una variable que tiene efectos indirectos sobre la calidad física del suelo que contribuyen a disminuir el riesgo de erosión eólica (Larson y Pierce, 1991; Shukla *et al.*, 2006; de Paul Obade y Lal, 2016) y contribuye a inferir sobre la susceptibilidad de un suelo a la misma. Según Quiroga *et al.* (2006) desde el punto de vista de calidad y fertilidad del suelo, un contenido de CO dado puede ser considerado bajo, medio o alto, dependiendo del contenido de arcilla del suelo. De aquí la importancia que adquiere el coloide orgánico en la región de estudio donde los porcentajes de la fracción arcilla son bajos y la estabilidad estructural y erodabilidad del suelo dependen fundamentalmente del componente orgánico.

La elección de la FE por sobre el K, se realizó a los fines de jerarquizar la representatividad de la variable respecto de la degradación por acción del viento. Si bien la contribución relativa del K indica alta sensibilidad al uso, los valores de este indicador reportados en el Capítulo V no se muestran por debajo de los niveles críticos mencionados por Losinno y Conti (2005). La disminución de los valores de los indicadores de calidad químicos de los suelos de la Pampa Medanosa ante la historia de uso pudo observarse en K, P, y fisicoquímicos, en CIC; pero la pérdida de calidad asociada a indicadores físicos ha sido más notoria, dado que los niveles que ha alcanzado han sido mayores.

3.2. Normalización de variables indicadoras

3.2.1. Carbono orgánico

El comportamiento del carbono orgánico (CO) en el suelo describe una curva del tipo logística creciente (Figura 61), con un comportamiento “*más es mejor*” (Tiessen *et al.*, 1994; Herrick y Wander, 1997). Se utilizó la siguiente ecuación en la normalización de los datos:

Ec. 18

$$y = \frac{a}{1 + \frac{x_j^{-b}}{x_i}}$$

Dónde y es el valor entre 0 y 1 que toman las observaciones; a es el máximo valor que tomará y ($a = 1$ en este caso), x es el valor de la observación de carbono orgánico en g.kg^{-1} en el sitio j ; x_i es el promedio del total de las observaciones ($x_i = 13,77 \text{ g.kg}^{-1}$); b es la pendiente de la curva ($b = -2$).

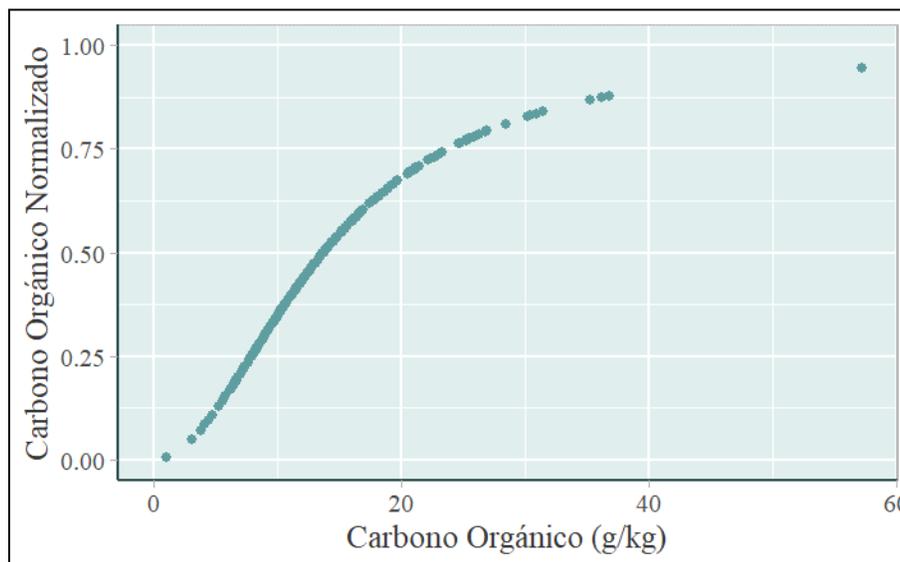


Figura 61. Representación gráfica de la función de normalización del carbono orgánico.

3.2.2. Fracción erodable

Para normalizar los valores obtenidos de fracción erodable (FE) se utilizó una función lineal decreciente del tipo “*menos es mejor*” (Ec. 19). Para obtener el valor del parámetro a ,

pendiente de la recta, simplemente se fijó un valor máximo de y igual a 1 cuando x vale 0 coincidiendo con el valor de la ordenada al origen; e y igual a 0 cuando x vale 100. De este modo se obtuvo el valor de la pendiente de una función lineal del tipo $f(x) = -ax + b$ (Figura 62).

Ec. 19

$$y = -0,01 x_j + 1$$

Donde y representa el valor de la fracción erodable normalizado entre 0 y 1, y x el valor porcentual de la fracción erodable en el sitio j .

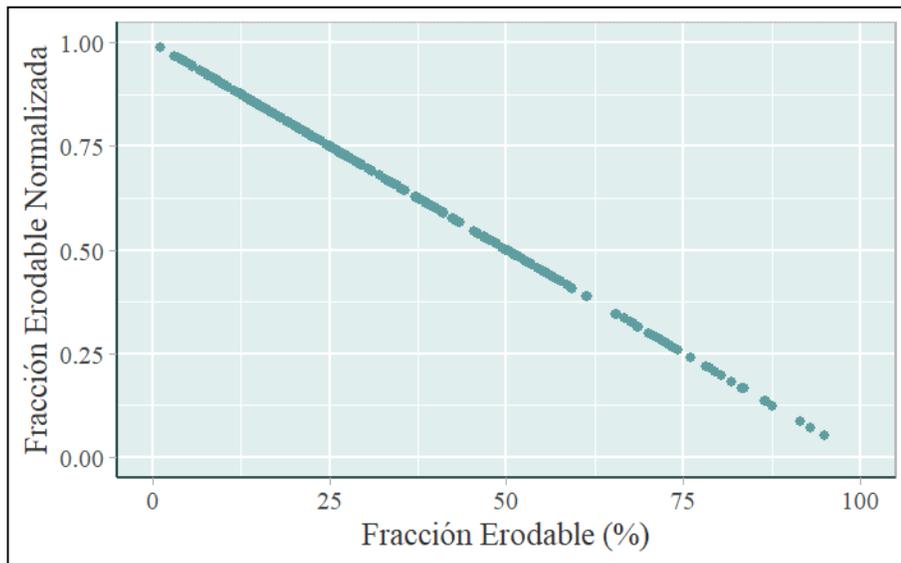


Figura 62. Representación gráfica de la función de normalización de la fracción erodable.

3.3. Integración del mínimo set de indicadores en un índice de fácil aplicabilidad

Los pesos ponderales extraídos del ADC fueron normalizados a uno para darle al índice la practicidad de ser leído como un porcentaje, y asignados a cada una de las variables indicadoras que componen el índice. El índice resultó entonces una combinación lineal de los valores de los atributos normalizados y los coeficientes canónicos normalizados a 1,

multiplicada por cien para lograr su expresión porcentual. El índice obtenido es de tipo aditivo y multiplicativo, posibilita ingresar valores de cero sin que el índice resulte obsoleto y sin perder de vista la importancia/relevancia que cada atributo expresó en el espacio discriminante.

En vista de que los atributos seleccionados son indicadores relacionados con la erosión eólica, se denominó este índice como “IREE” –índice de resistencia a la erosión eólica del área medanosa-.

La expresión matemática lograda fue la siguiente:

Ec. 20

$$\text{IREE} = \{ [CO * 0,627] + [FE * 0,373] \} * 100$$

Donde CO y FE, son los valores de las variables de un sitio en particular, normalizados.

Tras su aplicación a los datos relevados en Pampa Medanosa, el índice presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$) entre las situaciones evaluadas. En esta oportunidad se incluyeron además las situaciones de médanos (Tabla 31).

Tabla 31. Valores porcentuales medios, desvío estándar (DE) y coeficientes de variación (CV) para IREE.

Condición	n	Valor medio	D.E.	CV(%)	
Natural	35	70,73	11,3	15,98	A
Mixto sin maní	32	63,19	12,3	19,47	B
Mixto con maní	28	58,97	10,2	17,30	B
Agrícola sin maní	70	52,58	15,53	29,54	C
Agrícola con maní	85	47,3	15,48	32,74	D
Médano	33	35,19	13,74	39,05	E

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

La situación natural (N) presentó el mayor valor medio -70%- y la menor variabilidad, es decir que la mayoría los sitios en condiciones cuasi prístinas relevados presentaron valores del índice próximos a la media. En segundo lugar, se posicionaron los sistemas de producción agropecuarios mixtos agrícola-ganaderos sin y con cultivo de maní (Mx2 y Mx1, respectivamente) sin diferenciarse entre sí. Las situaciones agrícolas estuvieron un 10% por debajo de las mixtas en promedio. Las situaciones de uso agrícola sin cultivo de maní (A2) y con cultivo de maní (A1) ocuparon el tercer y cuarto lugar, respectivamente, mostrando diferencias significativas de un 5% en promedio entre sí. La variabilidad del índice sobre los suelos bajo usos puramente agrícolas fue un 10% mayor que en las situaciones mixtas. Y, finalmente, las condiciones de médanos fijados ocuparon el último lugar con el menor valor medio encontrado para el índice -35%-. Esta última situación fue la que mostró mayor variabilidad.

El empleo del IREE al comparar sistemas de producción mixtos y agrícolas reales detectó que la estabilidad de los suelos de los sistemas de producción mixtos es cercana a la exhibida por los sistemas de producción agrícola, esto, podría estar indicando que el manejo de los sistemas de producción mixtos, durante su ciclo agrícola, similar al de los agrícolas puros, no es compensado por período de pasturas que no logra cubrir los tiempos necesarios para la recuperación del suelo. Sin embargo, se observó que los sistemas mixtos presentaron valores mayores del índice, situándolos en un punto intermedio entre la agricultura y el no uso.

Los valores de referencia para el índice que se establecen en pos de los resultados máximos para la situación con mínimo deterioro (Naturales) y mínimos de aquella con el máximo deterioro (Médanos), estos valores son 90% y 10%, respectivamente. Su función es establecer valores críticos ambientales del índice en el área medanosa del sur de Córdoba.

Los coeficientes de variación encontrados son aceptables, pero podría lograrse su reducción al incrementar el número de muestras del estudio.

3.4. Alcances y limitaciones en el uso del índice



Se requiere garantizar que las predicciones no se extiendan más allá del alcance de los datos de referencia que dieron origen al índice (Karlen *et al.*, 1997). El IREE es un índice regional, válido para la región de la Pampa Medanosa Cordobesa, su utilización fuera de ella podría no ser apropiada, ya que la normalización de los datos se efectuó con valores medios y máximos de una población de muestras local. Además de ello, la exploración de la sensibilidad al uso del suelo también se realizó sobre el set de datos locales, por lo tanto, la misma metodología de construcción del índice en otra región podría detectar otras interacciones, resultando en un índice compuesto por indicadores diferentes. La selección de variables indicadoras por esta metodología puede arrojar resultados distintos en el tiempo, luego de intensos cambios en el uso de la tierra (Arshad y Coen, 1992; Brejda *et al.*, 2000a).

4. Conclusiones

Los indicadores con mayor sensibilidad al cambio de uso de del suelo en el área medanosa del sur de Córdoba resultaron ser la capacidad de intercambio catiónico, el carbono orgánico total, la fracción erodable y el potasio; dada la correlación encontrada entre las variables el set mínimo de indicadores fue constituido por carbono orgánico y por fracción erodable.

El set mínimo resultó entonces compuesto por dos indicadores relacionados con la susceptibilidad a la erosión eólica. Su empleo al comparar sistemas de producción mixtos y agrícolas reales fue capaz de detectar diferencias entre los sistemas. El valor del índice mostrados por los sistemas de producción mixtos fue cercano al exhibido por los sistemas de producción agrícola, lo que podría estar indicando que el ciclo ganadero no logra cubrir los tiempos requeridos para la recuperación del suelo luego de un período agrícola. El valor medio de las situaciones agrícolas con maní fue el menor de los cuatro usos agropecuarios, un 12% por encima del valor medio de médanos fijados.

Los valores críticos ambientales sugeridos en función de los máximos y mínimos encontrados fueron 90% y 10%, respectivamente.

Este índice podría ser de utilidad para el establecimiento de metas ambientales en estrategias de gestión ambiental, para la evaluación de la sustentabilidad de las actividades agropecuarias, y utilizarse como criterio ambiental que contribuya a la toma de decisiones sobre el uso y el manejo del suelo en el medio rural.

Referencias bibliográficas

- Alvarez, R., A. Gimenez, F. Pagnanini, V. Recondo, D. Gangi, M. Caffaro, J.L. De Paepe, G. Berhongaray (2020). Soil acidity in the Argentine Pampas: Effects of land use and management. *Soil and Tillage Research* 196.
- Andrews, S. S., & C. R. Carroll. (2001). Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management. *Ecological Applications*, 11(6), 1573-1585.
- Andrews, S. S., D. L. Karlen, & C. A. Cambardella. (2004). The soil management assessment framework. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.
- Andrews, S. S., D. L. Karlen, & J. P. Mitchell. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 90(1), 25-45. doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00174-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00174-8)
- Armenise, E., M. A. Redmile-Gordon, A. M. Stellacci, A. Ciccarese, & P. Rubino. (2013). Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 130, 91-98.
- Arshad, M. A., & G. M. Coen. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1-2), 25-31.
- Balzarini, M., C. Bruno, M. Córdoba, y I. Teich. (2015). Herramientas en el análisis estadístico multivariado. Córdoba, Argentina.
- Bécher Quinodóz, F. N., y M. Blarasin. (2015). Evaluación de relaciones acuífero libre-lagunas mediante modelación hidrogeoquímica e isotópica en la planicie medanosa del sur de Córdoba-Argentina. *Serie correlación geológica*, 31(2), 0-0.
- Bongiovanni, M. D., R. Marzari, y M. Ron. (2010). *Fósforo disponible en suelos agrícolas del sur de Córdoba y sudeste de San Luis*. Trabajo presentado en XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Santa Fe, Argentina.
- Bouma, J. (2015). Reaching out from the soil-box in pursuit of soil security. *Soil science and plant nutrition*, 61(4), 556-565.

- Brejda, J. J., D. L. Karlen, J. L. Smith, & D. L. Allan. (2000a). Identification of regional soil quality factors and indicators II. Northern Mississippi Loess Hills and Palouse Prairie. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2125-2135.
- Brejda, J. J., T. B. Moorman, D. L. Karlen, & T. H. Dao. (2000b). Identification of Regional Soil Quality Factors and Indicators I. Central and Southern High Plains *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2115-2124. doi: 10.2136/sssaj2000.6462115x
- Campitelli, P., A. Aoki, O. Gudelj, A. Rubenacker, y R. Sereno. (2010). Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del suelo*, 28(2), 223-231.
- Cantero, A., E. Bricchi, V. Becerra, J. Cisneros, y H. Gil. (1986). Zonificación y descripción de las tierras del Departamento Río Cuarto (Córdoba). *Ed. UNRC, Río Cuarto, Argentina*, 80pp.
- Cantú, M. P., A. Becker, J. C. Bedano, y H. F. Schiavo. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2), 173-178.
- Colazo, J. C., & D. E. Buschiazzo. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159 (1), 228-236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.016>
- Cruz, A. B., J. E. Barra, R. F. del Castillo, y C. Gutiérrez. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista ecosistemas*, 13(2).
- de Dios Herrero, J. M., J. C. Colazo, y D. E. Buschiazzo. (2017). *Fracción erosionable y distribución de agregados en seco en suelos de diferente granulometría*. Trabajo presentado en III Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y II Taller Nacional de Cartografía Digital, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
- de Paul Obade, V., & R. Lal. (2016). Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma*, 265, 96-102. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.023>
- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C. W. Robledo. (2017). *InfoStat (Version 2017)*. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.

- Doran, J. W., y T. B. Parkin. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*(definingsoilqua), 1-21.
- Doran, J. W., M. Sarrantonio, y M. A. Liebig. (1996). Soil Health and Sustainability. En D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 56, pp. 1-54): Academic Press.
- Druille, M., M. Castiglioni, y J. M. Massobrio. (2013). Fracción erosionable del suelo en el oeste Bonaerense bajo sistemas de uso de la tierra contrastantes. *Ciencia del suelo*, 31(1), 125-132.
- Duval, M. E., J. A. Galantini, J. O. Iglesias, S. Canelo, J. M. Martinez, & L. Wall. (2013). Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*, 131, 11-19.
- Galantini, J., & R. Rosell. (2006). Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 72-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.032>
- Herrick, J. E., & M. M. Wander. (1997). *Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity*: Boca Raton, CRC Press.
- Hevia, G. G., M. Mendez, y D. E. Buschiazzo. (2007). Tillage affects soil aggregation parameters linked with wind erosion. *Geoderma*, 140, 90-96.
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, & G. E. Schuman. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Lal, R. (2009). Ten tenets of sustainable soil management. *Journal of soil and water conservation*, 64(1), 20A-21A.
- Larson, W. E., & F. J. Pierce. (1991). *Conservation and enhancement of soil quality*.
- Losinno, B. N., y M. E. Conti. (2005). Evolución espacial y temporal de potasio en 30 años de agricultura continúa en el noreste de la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, 26, 23-24.
- Noellemeyer, E., A. R. Quiroga, & D. Estelrich. (2006). Soil quality in three range soils of the semi-arid Pampa of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 65(1), 142-155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.07.007>

- Panebianco, J. E., y D. E. Buschiazzo. (2008). Wind erosion predictions with the Wind Erosion Equation (WEQ) using different climatic factors. *Land Degrad. Dev.* , 19, 36-44.
- Parr, J. F., & R. I. Papendick. (1997). Soil quality: relationships and strategies for sustainable dryland farming systems. *Annals of Arid Zone*, 36(3), 181-191.
- Pesek, J. (1994). Historical perspective. In (eds.) En J. L. Hatfield y D. L. Karlen (Eds.), *Sustainable Agricultural Systems* (pp. 1-19). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Quiroga, A., D. Funaro, E. Noellemeyer, & N. Peinemann. (2006). Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 90(1-2), 63-68.
- Raiesi, F. (2017). A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators*, 75, 307-320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>
- Raiesi, F., & V. Kabiri. (2016). Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. *Ecological Indicators*, 71, 198-207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.061>
- Shukla, M. K., R. Lal, & M. Ebinger. (2006). Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil and Tillage Research*, 87(2), 194-204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.03.011>
- Tiessen, H., E. Cuevas, & P. Chacon. (1994). The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature*, 371, 783. doi: 10.1038/371783a0
- Vasu, D., S. K. Singh, S. K. Ray, V. P. Duraisami, P. Tiwary, P. Chandran, . . . S. G. Anantwar. (2016). Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India. *Geoderma*, 282, 70-79. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>



CAPÍTULO VII

IDENTIFICACIÓN DE MACROAMBIENTES POR SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN EÓLICA EN LA PAMPA MEDANOSA

1. Introducción

La exploración de la variabilidad espacial edáfica es esencial para la planificación sustentable del uso y del manejo del suelo. La concentración de las geoformas medianosas y de los focos de erosión sobre determinados sectores identificados en el Capítulo III, por un lado, y, la variabilidad encontrada en el análisis de los indicadores estudiados en el Capítulo V, por otro, han alertado respecto de la heterogeneidad espacial que presenta la Pampa Medanosa.

Esta región, ha sido históricamente manejada como un ambiente homogéneo, sin embargo, presenta variaciones climáticas y geomorfológicas (Jarsún *et al.*, 2006; Carignano *et al.*, 2014); y, por lo tanto, sus suelos tienen diferentes grados de susceptibilidad a ser erosionados por el viento. A pesar de ello, la expansión de la frontera agrícola en esta región ha avanzado sin contemplar su heterogeneidad espacial, situación que fue observada en el Capítulo IV.

El tratamiento de la Pampa Medanosa como un ambiente homogéneo ha contribuido a la degradación de sus suelos por procesos erosivos y a la pérdida de calidad tanto física como química (Capítulo V). Es por ello que se requiere profundizar en el estudio de la variabilidad edafológica intrarregional a través del estudio de algunos atributos de suelo y de la generación de mapas digitales elaborados mediante procesamientos geoestadísticos en sistemas de información geográfica (SIG).

Existen antecedentes de zonificación, a nivel nacional e incluyendo a la región de estudio a través de un índice paramétrico conocido como Índice de Productividad (IP); este índice fue propuesto por Riquier, Bramao y Cornet (1971) y posteriormente adaptado a las condiciones de Argentina por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). La Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, por intermedio del proyecto PNUD ARG 85/019, financió y encomendó al INTA la realización del Atlas de Suelos de Argentina y ello incluyó la evaluación de tierras mediante dos metodologías: una cualitativa, de acuerdo a la clasificación por Capacidad de Uso del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y una paramétrica empleando el mencionado Índice de Productividad (Morales *et al.*, 2015). Esta zonificación mediante el IP refiere a la capacidad productiva de los suelos, pero no a un proceso de degradación en particular.

La subdivisión de la región de estudio conforme a criterios edafológicos relacionados con la erosión eólica implica su zonificación en macroambientes con diferentes grados de susceptibilidad al principal proceso de degradación de los suelos presente en la Pampa Medanosa. Esta información constituye una herramienta de apoyo a la planificación del uso de los suelos de la región en función de su capacidad y de su susceptibilidad a la erosión, lo que permite contribuir a la selección de prácticas de manejo sustentables y a la mitigación de problemáticas de degradación evitando la transformación del ambiente y el avance de los procesos de desertificación.

La variabilidad intrínseca de los suelos resulta de la acción conjunta del clima, el material parental, el relieve, el material biológico y el tiempo cronológico de la formación del suelo (Jenny, 1994). A ella, se le añade la variabilidad de origen antrópico, inducida por el manejo histórico o actual de los suelos, principalmente, a través de los aportes o pérdidas de carbono y otros nutrientes Córdoba (2014). El empleo de análisis multivariados restringidos espacialmente (Dray *et al.*, 2008) permite el estudio de la variabilidad total teniendo en cuenta la correlación entre las variables y, además, su correlación espacial. La aplicación de esta metodología sobre propiedades de la superficie del suelo ha sido exitosamente llevada adelante para evaluar diferencias a escala regional en el material originario de los suelos de Francia por Arrouays *et al.* (2011). Por otro lado, propiedades físicas y químicas del suelo en combinación con la topografía han sido utilizadas para delimitar zonas de manejo empleando también esta metodología a escala de lote por Córdoba *et al.* (2016); situaciones que demuestran su adaptabilidad a diferentes escalas de trabajo.

La zonificación a través del estudio de la variabilidad espacial de diferentes indicadores de calidad de los suelos permite obtener subregiones que reflejan la productividad de los suelos. Sumado a ello, el empleo de un grupo de variables relacionadas a la erosión eólica para ejecutar la zonificación posibilita demarcar subregiones indicadoras del grado de susceptibilidad a este proceso de degradación. El objetivo de este capítulo fue entonces zonificar la región de la Pampa Medanosa en función de la susceptibilidad a la erosión eólica.

2. Materiales y métodos

2.1. Selección de indicadores para la delimitación de macro ambientes

Para la determinación de macroambientes dentro de la Pampa Medanosa, las variables empleadas como datos de entrada para la zonificación, fueron aquellas que resultaron sensibles a las prácticas de uso y manejo agropecuarias a los fines de plasmar la variabilidad antrópica. Ya que, las subregiones definidas no serán necesariamente estáticas y es probable que varíen ante el transcurso del tiempo como consecuencia de cambios en las prácticas de uso y manejo que los productores implementen, así como también en respuesta a factores aleatorios como ser factores climáticos (Córdoba, 2014).

Se incluyeron, en primer lugar, las variables que explicaron las mayores diferencias entre los usos de la tierra estudiados (Capítulo VI): carbono orgánico [CO] y fracción erodable [FE] que presentan una estrecha relación con la erosión eólica. A ellas, se sumaron la estabilidad estructural en seco [EES] y el contenido de arcilla más limo [A+L] dada su relación con la susceptibilidad de los suelos a ser erodados por el viento.

Se trabajó se trabajó con los datos provenientes de las muestras de suelo georreferenciadas y analizadas en laboratorio, cuyas especificaciones metodológicas han sido descritas en el Capítulo V. Se seleccionó como profundidad de muestreo el rango de 0-5 cm ya que es la capa superficial la expuesta a la acción del viento. Se emplearon 283 sitios georreferenciados en 3 de las 4 variables. En el caso particular de la EES se utilizaron 90 sitios.

2.2. Depuración y preparación de la base de datos

Para llevar adelante el proceso de depuración y preparación de la base de datos se siguió la metodología propuesta por Córdoba *et al.* (2014), incluyendo modificaciones en los algoritmos seleccionados para efectuar la interpolación espacial y el análisis de componentes principales espaciales. A continuación, se detalla el procedimiento seguido.

En primer lugar, se efectuó la transformación de las coordenadas geográficas a coordenadas cartesianas UTM (Universal Transverse Mercator) Zona 20 sur, elipsoide

WGS84, mediante el empleo de la función *spTransform* del paquete “*rgdal*” (Bivand *et al.*, 2014) para el software R (R Core Team, 2019).

Seguidamente, fueron removidos los *outliers*, o valores atípicos. Estos valores corresponden observaciones fuera del patrón general o distribución del conjunto de datos (Córdoba *et al.*, 2016). El procedimiento fue llevado adelante para cada una de las variables implicadas por separado. Se realizó en primer lugar un análisis exploratorio mediante la construcción de un histograma de frecuencias para observar la distribución de cada variable y un box-plot para observar la presencia de valores extremos atípicos. Se seleccionaron aquellos valores comprendidos en el rango signado por valores de ± 3 para la desviación estándar de acuerdo con Amidan *et al.* (2005). Para la depuración de los *outliers* fue preciso calcular en primera instancia los valores de la media y de la desviación estándar (DE). Luego se calcularon los límites, inferior (LI) y superior (LS) y posteriormente fueron seleccionados los datos que se ubicaron por dentro de estos límites (Córdoba *et al.*, 2019).

A continuación, se procedió a la eliminación de *inliers*. Estos valores corresponden a datos que se encuentran dentro del rango de valores comprendido por los límites establecidos, pero que difieren notoriamente de los valores que adquiere la variable en su vecindario. Para su identificación se empleó el Índice autocorrelación de Moran Local (Anselin, 1995).

Ec. 21

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S_i^2} \sum_j^n w_{i,j} (x_j - \bar{x})$$

El índice de Moran Local (I_i) se expresa como la diferencia entre el valor de la variable en el punto i (x_i) y la media (\bar{x}) dividida por su varianza, multiplicada por la suma de las diferencias de los valores de sus vecinos y la media afectados por un peso ponderal (w) que depende de la distancia entre los datos. Valores de este índice negativos y distintos de cero, son considerados *inliers*.

Se ajustó una regresión lineal entre los valores de autocorrelación de cada variable en cada sitio con la autocorrelación de sus vecindarios, definidos previamente por una matriz de ponderación espacial. Aquellos datos que se alejaron significativamente de la recta de 45° mostraron valores de la variable muy diferentes a los de su vecindario. Primero se eliminaron

los *inliers* detectados mediante el gráfico de dispersión de Moran y seguidamente aquellos señalados por valores negativos del índice de auto correlación de Moran Local (Córdoba *et al.*, 2014). Para el proceso de depuración de *inliers* se empleó la librería del software R “spdep” -Spatial Dependence: Weighting Schemes, Statistics- (Bivand, 2018).

Una vez depurada la base de datos, con la finalidad de realizar la interpolación espacial de los datos de cada una de las variables para la totalidad de la extensión de la región (kriging), fue requerida una caracterización de la variabilidad espacial de cada variable en particular. Para ello se empleó la librería “automap” -Automatic interpolation package- del software R (Hiemstra *et al.*, 2009), que permite la exploración del comportamiento de los datos en el espacio a través de funciones semivariogramas. Estas funciones representan la variación de la correlación espacial de una variable en particular al aumentar la distancia entre los datos (Bivand *et al.*, 2013). Puntos próximos entre sí expresaran una semivarianza menor que puntos alejados entre sí en el mapa (Malone *et al.*, 2017). La varianza promedio de una variable entre dos puntos (semivarianza), puede ser expresada según Malone *et al.* (2017) como:

Ec. 22

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{s(x_i) - s(x_i + h)\}^2$$

Donde $\gamma(h)$ es la media de la semivarianza, m es el número de pares de puntos de muestreo, S el valor del atributo bajo investigación, x las coordenadas del punto i , y h es la distancia de separación del par de puntos.

Con la finalidad de obtener estimaciones de la función para todos los puntos de la región del estudio, sobre el semivariograma empírico, se ajustó un semivariograma teórico mediante la función autokrige del paquete “automap”, este semivariograma fue empleado para construir la matriz de distancias ponderadas requerida para efectuar una interpolación espacial por kriging ordinario (Webster y Oliver, 2007). Se emplea esta matriz para ponderar de forma distinta las muestras que están próximas entre sí respecto de aquellas muestras que están alejadas al sitio para el cual se pretende estimar un valor por interpolación, ya que se

asume que sitios más próximos entre sí en el espacio presentarán valores más parecidos entre sí que con aquellos puntos más distantes.

La distancia seleccionada para la construcción de la grilla de predicción fue de 1000 metros. Obteniéndose finalmente una grilla de 14.162 puntos con datos para cada variable, de la que fueron extraídos los valores predichos en cada punto para finalmente comenzar el proceso de identificación de macroambientes en la Pampa Medanosa.

2.3. Análisis de la variabilidad espacial

Con el conjunto de datos predichos, obtenido en el apartado precedente, realizó un análisis de componentes principales espacial (ACP-espacial). Este análisis se llevó adelante con la finalidad de encontrar aquellas combinaciones lineales –variables sintéticas- capaces de explicar el mayor porcentaje de la variabilidad total presente en la región. El análisis fue realizado empleando la librería “adespatial” -Multivariate Multiscale Spatial Analysis- para el software R (Dray *et al.*, 2020). Las variables de síntesis obtenidas fueron posteriormente utilizadas para la identificación de las subregiones mediante un análisis de clúster.

El análisis multivariado se desarrolló empleando la función *multispati* del paquete “adespatial”. El ACP- espacial combina el análisis de componentes principales con el Índice de Autocorrelación espacial Global de Moran (Dray *et al.*, 2008) que se determina como la diferencia entre el valor de la variable en un punto y la media por la diferencia entre el valor de los vecinos y la media, afectados por un valor ponderal dado por la inversa de la distancia a los vecinos y el cuadrado de la diferencia entre el valor de la variable en un punto dividido por un denominador que permite la estandarización de los valores. El Índice de Moran Global (Moran, 1948) se expresa mediante la siguiente ecuación:

Ec. 23

$$I = \frac{\sum_{i,j} w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i,j} w_{ij}) \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde n es el número total de observaciones, x_i es el valor de la variable en el sitio i y x_j es el valor de la variable en el sitio j , w es el peso ponderal que determina la comparación de las observaciones calculado como la inversa de la distancia entre i y j .

Mediante el estudio de la autocorrelación espacial, se puede observar si una variable muestra o no tendencia a tomar valores análogos en lugares geográficamente cercanos (Anselin, 2001).

Los valores que toma el Índice de Moran Global están comprendidos dentro del rango 1 y -1. Valores del índice próximos a 0 indicarán aleatoriedad y ausencia de correlación espacial. Un índice de Moran igual a 1 implicará una correlación perfecta, y aquellos datos próximos presentarán valores semejantes, por el contrario, valores cercanos a -1 indicarán que los valores que expresan las variables son totalmente opuestos. Valores altos y positivos de este índice indicarán la presencia de clústeres (Córdoba *et al.*, 2014).

De la realización del ACP-espacial se obtuvieron las variables sintéticas, que responden a combinaciones lineales de las variables incluidas en el análisis y un valor de ponderación que representa el grado de contribución relativa de cada atributo a la variabilidad total. El empleo de estas variables de síntesis permite la caracterización de la variabilidad espacial regional en un plano bidimensional, explicada por todas las variables implicadas en el análisis, la correlación existente entre ellas y su correlación en el espacio Arrouays *et al.* (2011).

2.4. Análisis de clústeres

Para el caso de estudio, las variables de síntesis devenidas del análisis multivariado se emplearon como datos de entrada para un análisis de conglomerados *fuzzy k-means* según la metodología propuesta por Córdoba *et al.* (2014). En el análisis de clústeres empleando el algoritmo *fuzzy k-means* no está restringido espacialmente, por lo que Córdoba (2014) plantea la incorporación de la autocorrelación espacial a través del empleo de las variables de síntesis obtenidas del PCA espacial. De este modo la autocorrelación espacial es tenida en cuenta antes de la obtención de la matriz de distancias.

Para efectuar la identificación de los conglomerados (subregiones) se empleó la librería “e1071” para el software R (Meyer *et al.*, 2019) siguiendo el protocolo propuesto por Córdoba (2014). El número óptimo de zonas se determinó mediante la determinación de un índice resumen, propuesto por Córdoba (2014), calculado integrando los índices: Xie-Beni, (Xie y Beni, 1991), el coeficiente de partición (Bezdek, 1981), entropía de clasificación (Bezdek, 1981), y Fukuyama-Sugeno (Fukuyama y Sugeno, 1989). El número de clases óptimo es aquel que presenta un mayor valor del índice resumen.

La capa raster de subregiones fue obtenido empleando el paquete “raster” del software R (Hijmans, 2019) y el mapa final fue diseñado mediante el empleo de Q Gis (QGIS Development Team, 2019).

2.5. Validación de las sub regiones

Se comprobó que cada macroambiente fuera diferente -validación- mediante un análisis de la varianza empleando modelos lineales mixtos (Pinheiro y Bates, 2004) con efectos fijos de la subregión y errores correlacionados espacialmente, con el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2017).

3. Resultados y discusión

El producto final obtenido, consistió en un mapa de la región de la Pampa Medanosa Cordobesa, en el que se observa una subdivisión en macroambientes con diferentes grados de susceptibilidad a la erosión eólica.

A continuación, se presentan y discuten los resultados de las instancias parciales hasta arribar al mapa final en cuatro partes: primero de la constitución de la base de datos y la construcción de las interpolaciones por kriging para la obtención de los valores predichos; segundo, de los resultados del ACP-espacial y del análisis de clústeres; tercero se efectúa una caracterización de las subregiones por susceptibilidad a la erosión eólica obtenidas y se presenta el mapa final; por último, se expone la validación.

3.1. Preparación de la base de datos

De los 942 datos inicialmente incluidos en la base de datos preparada para efectuar el protocolo de zonificación el 12% de los datos presentaron valores atípicos. La base de datos final se conformó con el 88% de los datos iniciales, siendo el número de datos incluidos finalmente en el análisis espacial 833.

No todas variables seleccionadas para llevar adelante la identificación de las subregiones presentaron valores atípicos. En el caso del carbono orgánico se identificaron 5 outliers que afectaban la distribución de la variable. Al comparar las Figuras 63.a y 63.b que corresponden al histograma de frecuencias relativas y al box-plot previos a la eliminación de los outliers, respectivamente, con las Figuras 63.c y 63.d que muestran los resultados luego de la depuración de los datos, puede apreciarse como la eliminación de los valores extremos mejora la distribución de la variable.

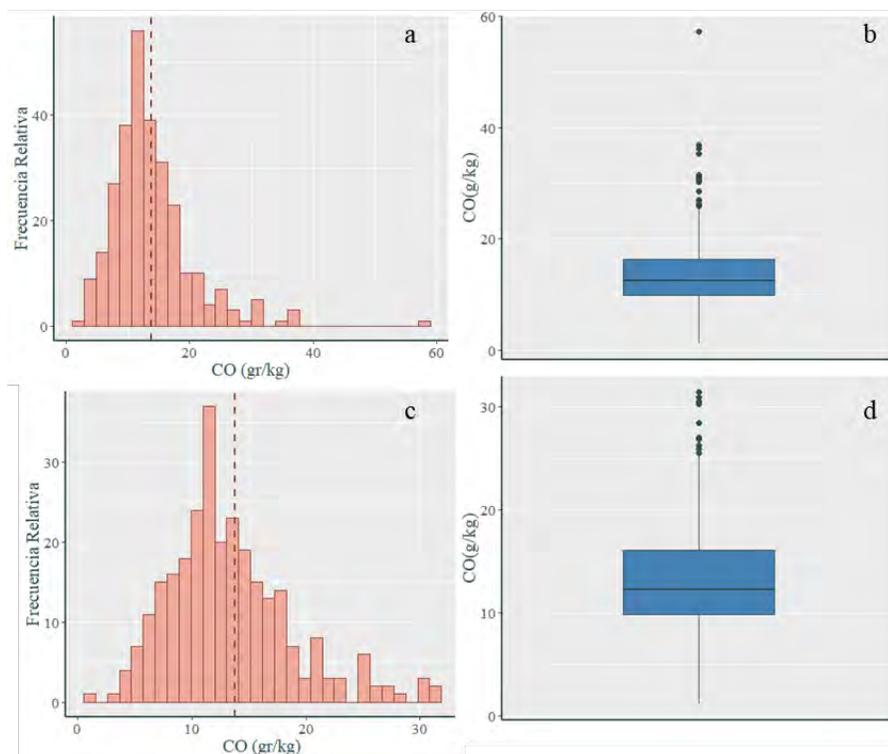


Figura 63. a) Distribución de frecuencias relativas para carbono orgánico (g. kg^{-1}) 0-5 cm sin remoción de valores atípicos. b) Box-plot para carbono orgánico (g. kg^{-1}) 0-5 cm sin remoción de valores atípicos. c) Histograma de frecuencias relativas para carbono orgánico (g. kg^{-1}) 0-5 cm con remoción de valores atípicos. d) Box-plot para carbono orgánico (g. kg^{-1}) 0-5 cm con remoción de valores atípicos. La línea segmentada señala la ubicación de la media.

Posteriormente, fueron eliminados 35 inliers (Figura 64). Es importante mencionar que el número de inliers se aproxima al número de muestras correspondientes a las situaciones naturales (Capítulo V), este hecho resalta el desempeño de la metodología empleada para separar aquellas muestras que difieren de su vecindario, ya que estas muestras fueron tomadas en situaciones prístinas dentro de un ambiente totalmente fraccionado y dominado por el uso agropecuario. Por ejemplo, muestras de suelos bajo isletas de chañar dentro rodeadas por cultivos, que poseen escasa superficie y que, por lo tanto, tendrán la mayor proporción de muestras vecinas tomadas en suelos bajo usos agropecuarios.

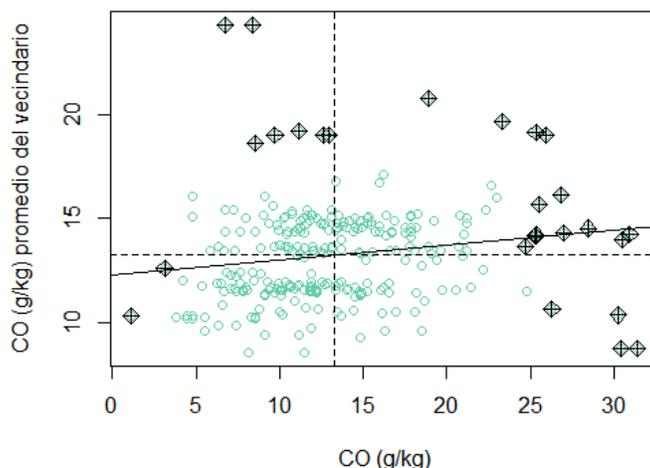


Figura 64. Gráfico de dispersión de Moran de la variable carbono orgánico (CO) de 0-5 cm (g. kg^{-1}). En negro, datos diferentes a su vecindario.

Se logró una interpolación por kriging que exhibe los mayores valores de carbono orgánico en aquellas áreas más planas de la región. El mapa de interpolación espacial obtenido para CO muestra un menor error estándar en las zonas donde se concentraron la mayor proporción de sitios visitados (Figura 65).

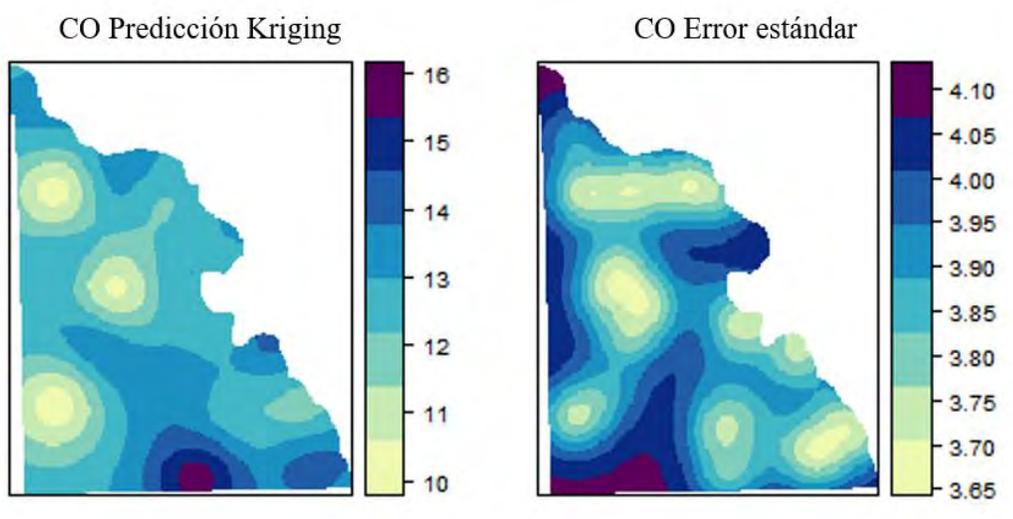


Figura 65. Mapa de interpolación espacial por kriging y error estándar de la predicción para la variable carbono orgánico (CO) (g.kg^{-1}).

Los menores valores de CO se observan sobre los sectores con un mayor número de médanos (Capítulo III), mientras que el área con mayores contenidos de CO se posiciona hacia el sur de la región donde los suelos presentan texturas más finas, sobre y hacia el este del alto estructural Villa Huidobro-Huinca Renancó (Figura 66). Para esta área que en la Figura 66 se observa de color azul oscuro, la Hoja 3563-13 Huinca Renancó menciona la presencia de una planicie limo-arenosa; puntualmente hacia el sur de la localidad Huinca Renancó donde se observa la presencia de suelos desarrollados sobre sedimentos fluvio-eólicos de textura franca y en algunos casos puede contener hasta el 50% de limo transportados posiblemente por derrames provenientes de cubetas y lagunas en períodos lluviosos del pasado reciente. En este sector la capa freática se halla próxima a la superficie. Algunos suelos pueden presentar variantes calcáreas o lentes de materiales petrocálcicos (tosca en profundidad), mientras que en otros sectores pueden encontrarse recubiertos por sedimentos eólicos más recientes de textura franco arenosa. Sobre esta área predomina la Serie Villa Huidobro, que corresponde a un suelo bien drenado, desarrollado sobre materiales francos y presenta $9,8 \text{ g. kg}^{-1}$ de CO hasta los 20 cm (Hoja 3563-13 Huinca Renancó, Cartas de suelos de Córdoba).

Sobre el extremo este de la región pueden mencionarse la Serie El Veintitrés, El Yará y la Serie Italó (Hoja 3563-14 Buchardo, Cartas de Suelos de Córdoba), para las que sus perfiles típicos indican valores de carbono orgánico de 9 g.kg^{-1} , $9,3 \text{ g.kg}^{-1}$ y $11,2 \text{ g.kg}^{-1}$ respectivamente, de 0 a 20 cm de profundidad. Series como El Alfalegre, Cañada Verde, Pincén, de la misma hoja, mencionan valores por encima de 10 g.kg^{-1} para la totalidad del horizonte superficial (0-20 cm).

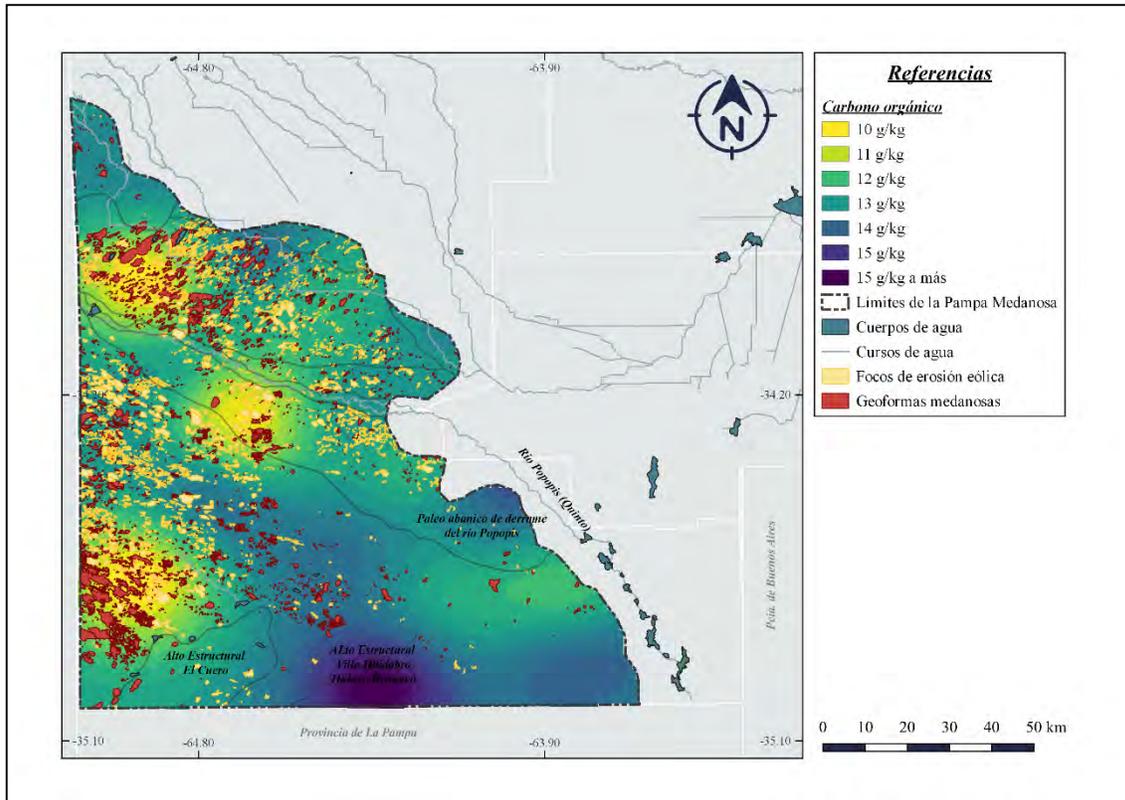


Figura 66. Representación de la variabilidad espacial del carbono orgánico (g.kg^{-1}) asociada la geomorfología de la región –empleando una adaptación de Geomorfología de la provincia de Córdoba perteneciente a Carignano *et al.*, (2014)- y a la localización de los campos de dunas y focos de erosión identificados en el Capítulo III.

En el caso de la fracción arcilla más limo, la metodología empleada no señaló ningún valor superior o inferior al valor de 3 veces la desviación estándar. De todos modos, en las Figuras 67.a y 67.b se observa un valor que, si bien los valores se alejan de la media, no superan el valor de tres veces la desviación estándar, por consiguiente, se conservaron los 283 datos de la variable arcilla más limo. Esta misma situación se repitió en el caso de la fracción erodable (Figuras 68.a y 68.b), situación esperable dada la dependencia entre estas variables encontrada en el Capítulo V.

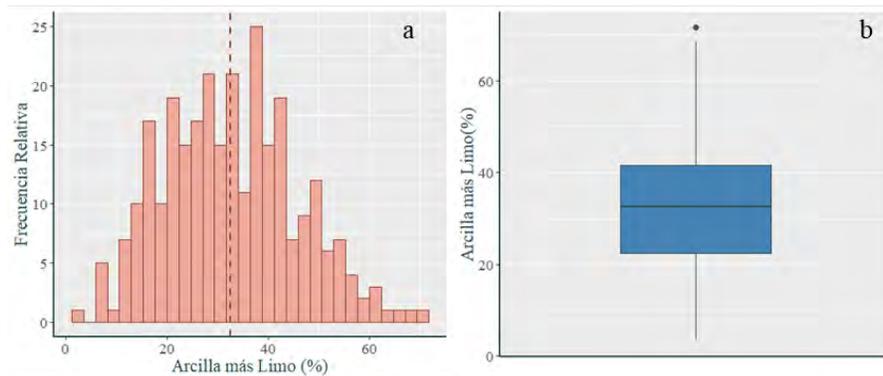


Figura 67. a) Histograma de frecuencias relativas para arcilla más limo (%) 0-5 cm. b) Box-plot para arcilla más limo (%) 0-5 cm. La línea segmentada señala la ubicación de la media.

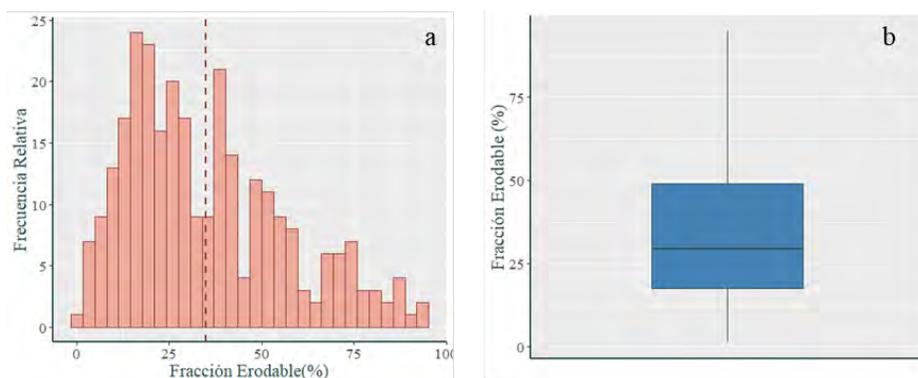


Figura 68. a) Histograma de frecuencias relativas para fracción erodable (%) 0-5 cm. b) Box-plot para carbono orgánico fracción erodable (%) 0-5 cm. La línea segmentada señala la ubicación de la media.

Para estas dos variables se hallaron 24 y 25 inliers respectivamente. En las Figuras 69 y 70 se observa una gran semejanza en los puntos que fueron determinados como inliers para arcilla más limo y para fracción erodable. Situación que replica lo ocurrido para los outliers y que marca la estrecha relación entre estas dos variables. En estas Figuras se observa, además, que la fracción erodable presenta mayor inclinación de la recta de regresión, y, por lo tanto, una mayor autocorrelación espacial que la fracción arcilla más limo. Esto indica, que la variable fracción erodable tiene una mayor capacidad para contribuir a la demarcación de clústeres en la Pampa Medanosa.

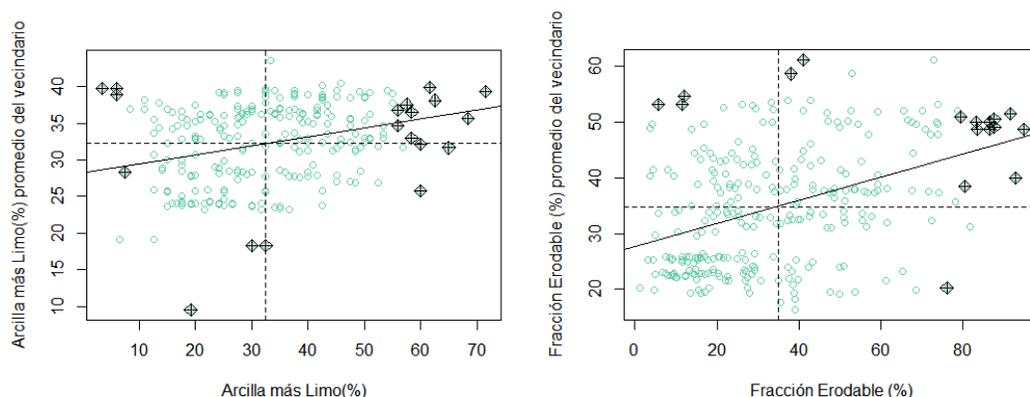


Figura 69 (izquierda) y 70 (derecha). Gráficos de dispersión de Moran de la variable arcilla más limo de 0-5 cm (%) y de la variable fracción erodable de 0-5 cm (%). En negro, datos diferentes a su vecindario.

Las diferencias en la formación de aglomeraciones entre estas dos variables observada en los gráficos de dispersión de Moran se aprecia también en las Figuras 71 y 72. La variable arcilla más limo, presentó un rango menor en el semivariograma teórico ajustado para realizar la modelación espacial. Esto indicó que, para esta variable en particular, la toma de muestras fue demasiado espaciada y, por lo tanto, el error estándar de la predicción fue alto (Figura 71). Este comportamiento fue diferente al que se percibe en el caso de la fracción erodable (Figura 72), para esta variable la interpolación por kriging, presentó una mayor precisión que para la anterior, mostrando que los suelos del sureste de la región presentan menores porcentajes de agregados erosionables por el viento. Este hecho se condice con lo señalado por Jarsún *et al.* (2006) y Carignano *et al.* (2014), quienes han mencionado que sobre el sureste de la planicie medanosa se hallan los suelos más resistentes y evolucionados de la región.

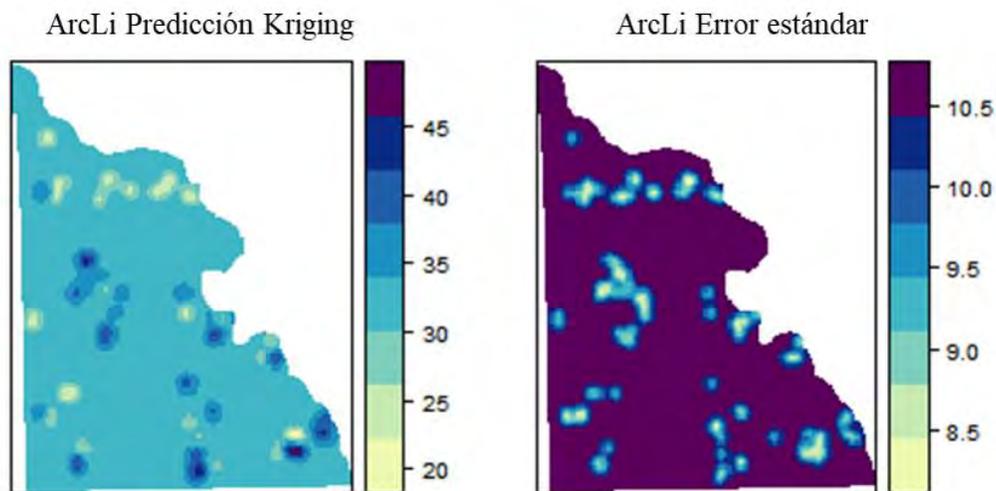


Figura 71. Mapa de interpolación espacial por kriging y error estándar de la predicción para la variable arcilla más limo (ArcLi) de 0-5 cm (%).

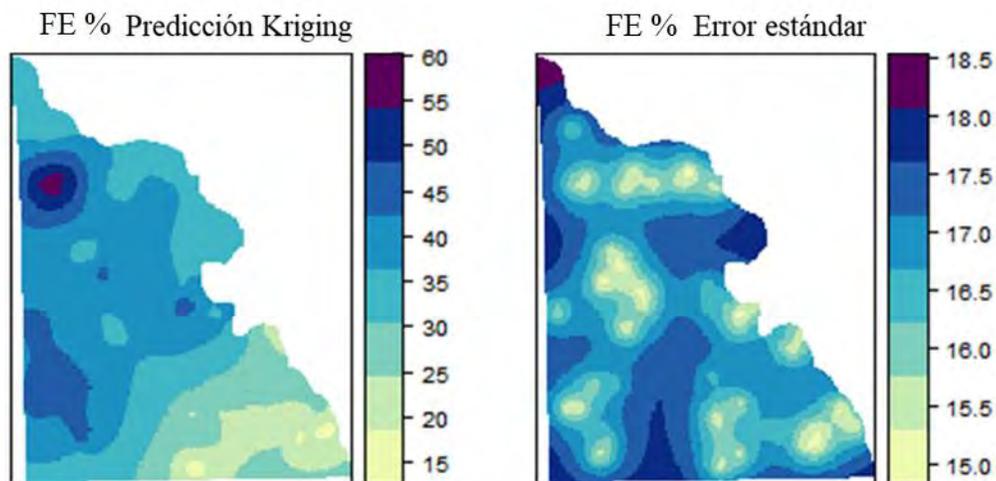


Figura 72. Mapa de interpolación espacial por kriging y error estándar de la predicción para la variable fracción erodable (FE) de 0-5 cm (%).

Por otra parte, y en coincidencia con lo hallado en el Capítulo III, se observan dos áreas con mayor porcentaje de fracción erodable asociadas a los campos de dunas mencionados por Carignano *et al.* (2014) y Cantú y Degiovanni (1984) y a un área próxima al río Popopis, sobre la cual Carignano *et al.* (2014) sitúa el paleo abanico de derrame del mencionado río (Figura 73).

Vicondo *et al.* (2016), han reportado en un ensayo a campo con un cultivo de maní, aproximadamente 20 km al norte de la localidad de Huinca Renancó, valores de fracción erodable de 82% en para la Serie El Veintitrés (Haplustol éntico) y 92 % para la Serie Huinca Renancó (Ustipsamment típico), muy superiores a los predichos por la interpolación espacial llevada adelante en esta investigación. Ello, sugiere una gran participación del uso y del manejo sobre la designación de los macro ambientes por susceptibilidad a la erosión y cuán sujetos están a la escala de trabajo. Ante variaciones en el uso y el manejo, las dimensiones de las subregiones por erosión, empleando las variables propuestas, probablemente se percibirán cambios. Esto indica que, ante la planificación de manejos del suelo sustentables y usos coherentes con su aptitud, podría verse modificada la extensión de las subregiones por erosión eólica.

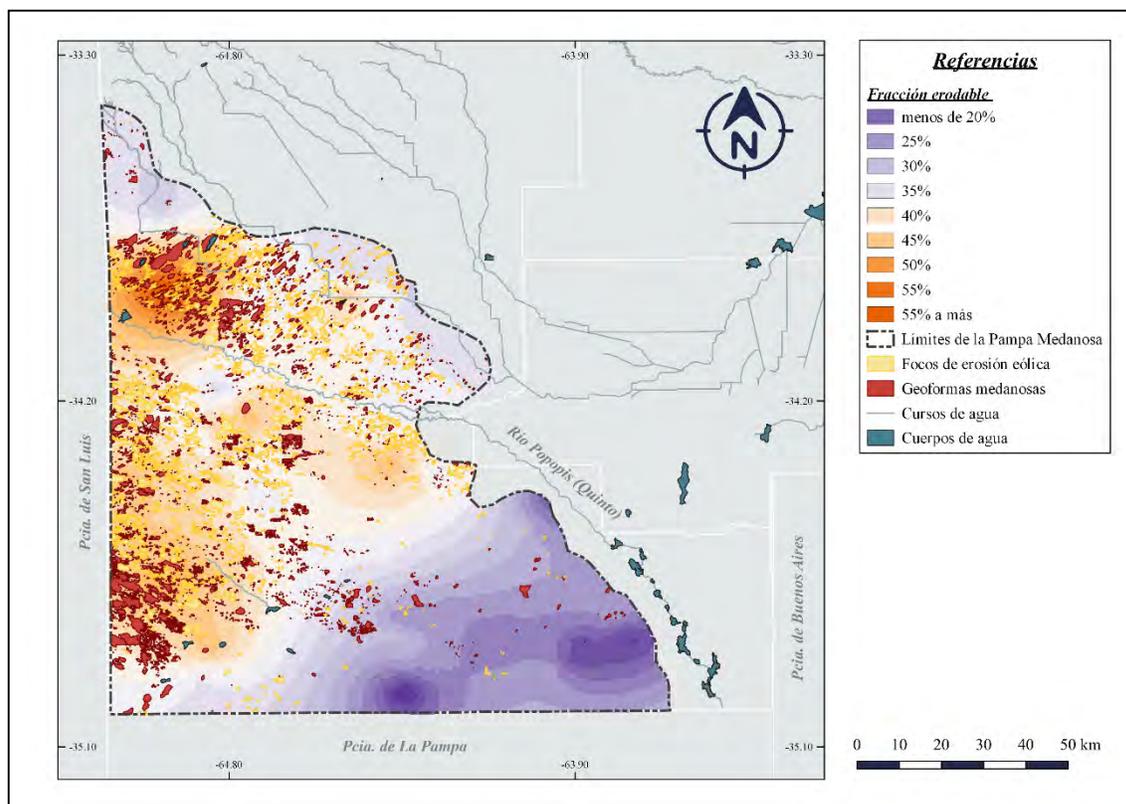


Figura 73. Representación de la variabilidad espacial de la fracción erodable (%) asociada a la localización de los campos de dunas y focos de erosión identificados en el Capítulo III.

En el caso de la estabilidad estructural en seco (EES), tampoco fueron identificados valores a considerarse outliers según el rango de selección preestablecido. Al observarse la distribución y el box-plot en la Figuras 74.a y 74.b, puede sentarse el precedente de que, para trabajar con esta variable a escala regional, con la característica de ser afectada muy significativamente por el uso y el manejo y por consiguiente adquirir valores muy fluctuantes, debiera contemplarse la posibilidad de incrementar el número de muestras en la medida de lo posible para aproximar la distribución de las frecuencias a una distribución normal y modificar la amplitud del rango de valores que determinan la selección de los datos atípicos. Existen trabajos que emplean valores de 2,5 veces el desvío estándar (Córdoba *et al.*, 2014) hasta 4 veces el desvío estándar (Córdoba *et al.*, 2012).

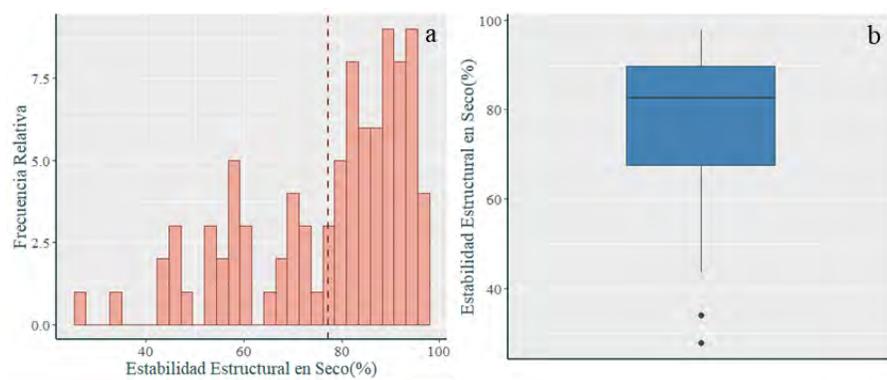


Figura 74. a) Distribución de frecuencias relativas para estabilidad estructural en seco (%) 0-5 cm. b) Box-plot para estabilidad estructural en seco (%) 0-5 cm. La línea segmentada señala la ubicación de la media.

Entre los datos analizados en el estudio fueron observados valores de muy baja estabilidad, totalmente diferentes de su vecindario, estos representaron siete datos en total con características de inliers. Se pudo observar también que el comportamiento de la EES difiere de los datos de su vecindario en mayor medida que las anteriores variables, lo que marca un acentuado impacto del uso y del manejo del suelo sobre esta variable. Este hecho se reflejó en una autocorrelación negativa, ya que el índice de Moran Local tomó para esa variable valores menores a cero, situación que indicó que los valores de EES fueron opuestos

y contrastantes a los de sus vecindarios (Figura 75). Esto probablemente se deba a que el muestreo intentó cubrir diferentes usos del suelo en situaciones lo más próximas posibles para evitar incluir variabilidad explicada por otros factores diferentes al uso como lo son los cambios texturales, por ejemplo, y fue planificado intentando buscar situaciones de uso contrastantes, sobre un mismo suelo. Esto se vio reflejado en el Índice de Moran Local en la variable EES que es dinámica y muy sensible al uso y manejo actual.

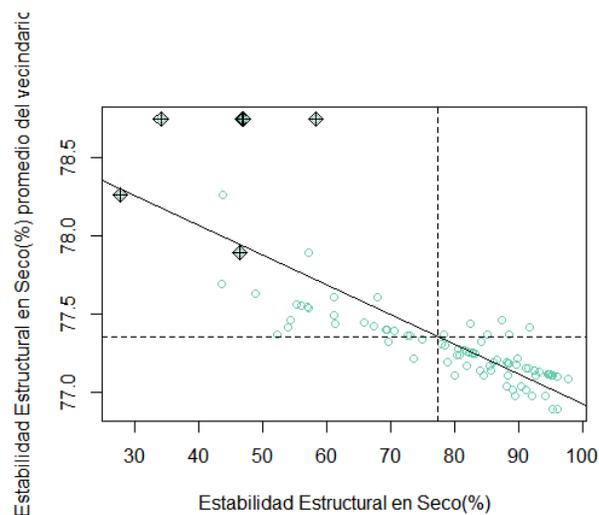


Figura 75. Gráfico de dispersión de Moran de la variable estabilidad estructural en seco (EES) de 0-5 cm (%). En negro, datos diferentes a su vecindario.

La EES fue incluida de todas formas en la identificación de subregiones por susceptibilidad a la erosión eólica, aunque no presentara tendencia a la demarcación de clústeres, a modo de indicador diagnóstico del estado actual de la susceptibilidad a la degradación física de los suelos a lo largo de la extensión de la Pampa Medanosa. Es necesario resaltar que el mapa provee una imagen diagnóstica del estado actual de la susceptibilidad a la erosión de la región y que de igual modo que la estabilidad estructural en seco, la fracción erodable y el carbono orgánico fluctúan en el tiempo en respuesta al uso y manejo del suelo; por consiguiente, también podrían hacerlo las subregiones por susceptibilidad a la erosión eólica. La zonificación, es una herramienta aplicada y enfocada en este estudio a segmentar macroambientes puntualmente en función del principal proceso

de degradación del suelo presente en la región, por tal motivo la se incluyeron variables como FE y EES sensibles a cambios en el corto plazo en función del uso y el manejo del suelo. Sin embargo, la herramienta puede emplearse con un enfoque más próximo a la regionalización por taxonomía siguiendo el enfoque *Scorpan* propuesto por McBratney *et al.* (2003), y es por ello que se debe prestar especial atención a las variables con las que el análisis es constituido, ya que, la selección de las variables depende del objetivo de la construcción del mapa.

La Figura 76 permite observar que interpolación espacial por kriging de esta variable mostró un elevado error estándar, dado que el rango del semivariograma teórico ajustado fue demasiado pequeño. Esto se explica por la baja autocorrelación espacial que la variable presentó, en pos de su dependencia de otros factores que la modifican rápidamente en el espacio. Por lo tanto, y a esta escala de trabajo, la predicción por kriging de esta variable para los vecindarios definidos no mostró aglomeraciones.

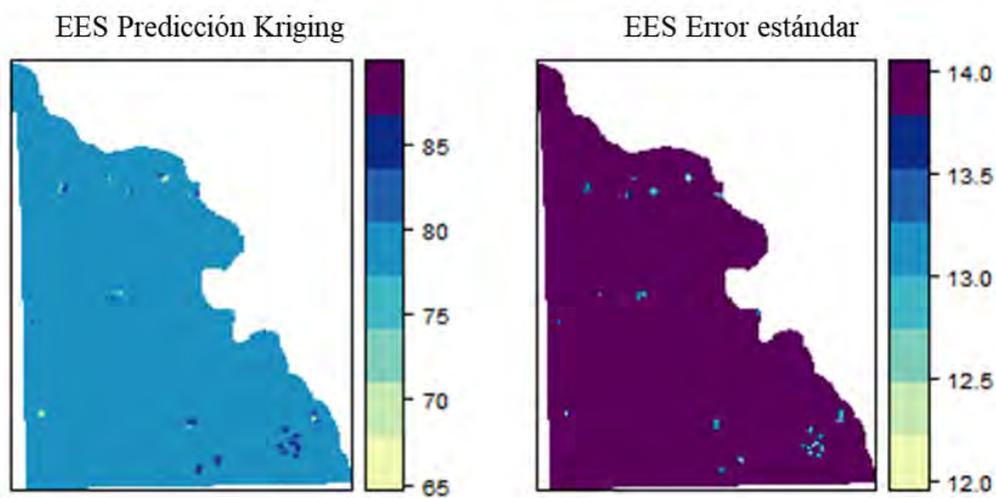


Figura 76. Mapa de interpolación espacial por kriging y error estándar de la predicción para la variable estabilidad estructural en seco (EES) de 0-5 cm (%).

En la siguiente tabla (Tabla 32) se sintetiza la composición de la base de datos obtenida. Los números de outliers fueron bajos en general. Aumentando en carbono orgánico y capacidad de intercambio catiónico de muestras de condiciones prístinas, y en calcio por contenidos de carbonatos de calcio.

La depuración principalmente consistió en la eliminación de inliers, dada la presencia de datos correspondientes a situaciones naturales de mínimo y máximo deterioro (montes y médanos fijados) que difirieron de sus vecindarios y/o que pudieron afectar la composición de los vecindarios. Por lo que se sugiere que, ante la aplicación de esta metodología, se prevean las condiciones de suelos a incluir en el análisis. Si se pretende trabajar a escala regional, la inclusión de sitios prístinos puntuales será considerada inlier por la metodología, exceptuando que se cuente con la posibilidad de incrementar los datos prístinos y así mejorar la composición de su vecindario. Inicialmente de las 283 muestras 68 correspondían a situaciones de referencia (35 montes y 33 médanos fijados), de todos modos, en ninguna de las variables incluidas en el análisis la metodología llegó a retirar la totalidad de las muestras de referencia. En el caso particular de la estabilidad estructural, únicamente se trabajó con situaciones procedentes de lotes agrícolas o mixtos, por ello, no se observaron datos extremos y la presencia de inliers sobre el total de muestras fue menor.

Tabla 32. Numero de valores atípicos y diferentes a su vecindario removidos y tamaño final de la base de datos empleada en la interpolación espacial por kriging.

Variable	Nº inicial	Outliers	Inliers	Base de datos depurada
Carbono orgánico	283	5	35	243
Arcilla más Limo	283	0	24	259
Fracción Erodable	283	0	25	258
Estabilidad Estructural en Seco	90	0	7	83

3.2. Análisis espacial de componentes principales (ACP-Espacial) y análisis de clústeres.

Los valores del Índice de Moran Global presentados por las componentes principales espaciales fueron positivos y diferentes de cero, lo que indica que las todas combinaciones lineales obtenidas por el análisis mostraron autocorrelación espacial permitiendo la

zonificación. Las tres primeras componentes mostraron los valores más altos y representaron el 94% de la variación espacial total (Tabla 33), por lo tanto, estas tres variables de síntesis fueron las seleccionadas para emprender el análisis de clústeres.

Dado que las primeras tres componentes explicaron aproximadamente el 75% de la variabilidad espacial presente, fue suficiente utilizar las primeras tres variables de síntesis para efectuar la zonificación.

Tabla 33. Autovalores, varianza espacial e índices de Moran de las componentes principales espaciales (CPs) generadas a partir de Multispati-PCA sobre los atributos de suelo estudiados.

CPs	Autovalores	Varianza Espacial	Proporción	Proporción Acumulada	Índice de Moran
1	1,45	1,78	44,50	44,50	0,82
2	0,20	0,31	7,75	52,25	0,70
3	0,12	0,94	23,50	75,75	0,12
4	0,00	0,97	22,75	98,50	0,00

La importancia que cada uno de los atributos de calidad de suelo tuvo en la determinación de los macroambientes fue aquella expresada a través de los coeficientes canónicos estandarizados en la Tabla 34. Estos valores, son los coeficientes de ponderación empleados para construir las combinaciones lineales e indican la importancia relativa de cada atributo en la explicación de la variabilidad espacial total entre las observaciones en cada eje.

Tabla 34. Contribución relativa de cada atributo de suelo en cada una de las componentes principales espaciales seleccionadas. Se subrayan los coeficientes de mayor importancia.

Variables	CS1	CS2	CS3
Arcilla más Limo	-0,13	0,13	<u>0,98</u>
Carbono Orgánico	<u>-0,67</u>	<u>-0,75</u>	0,01
Fracción Erodable	<u>0,74</u>	<u>-0,64</u>	0,19
Estabilidad Estructural en Seco	-0,07	0,05	0,06

En la primera de las componentes principales, la mayor parte de la variabilidad espacial total fue explicada principalmente por dos indicadores, el primero de ellos fue el contenido de carbono orgánico (CO), secundado por la fracción erodable (FE). Sobre la segunda componente la FE cobró mayor importancia. La tercera componente representó fundamentalmente la variación de la textura.

Las componentes espaciales obtenidas fueron capaces de expresar la variabilidad de los principales atributos de suelo relacionados con la erosión eólica, en el siguiente biplot, se tiene una representación gráfica de los dos primeros ejes PCA-espacial. En él se puede apreciar la separación desde los ejes de aquellos atributos que mejor explicaron la variación espacial regional sobre las componentes principales 1 y 2. Se observó una relación inversa entre los atributos CO y FE (Figura 77). Esto indica que al incrementarse la fracción erodable hay una tendencia a la reducción del carbono orgánico. También se aprecia que a medida que se incrementa la FE se reducen la estabilidad estructural en seco (EES) y la fracción arcilla más limo (ArcLi).

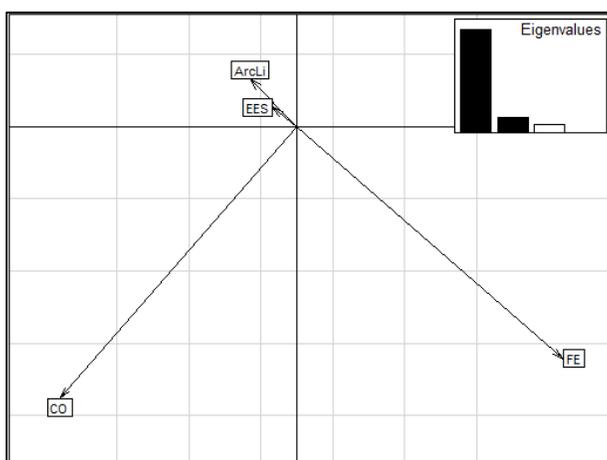


Figura 77. Contribución relativa de las variables analizadas a la variabilidad espacial total. Referencias: carbono orgánico (CO); fracción erodable (FE); arcilla más limo (ArcLi); estabilidad estructural en seco (EES). Eigenvalues: Valor propio de cada una de las componentes, representativo de la porción de variabilidad que explica cada una y determinante de su orden.

En función del índice Resumen se determinó que el número óptimo de clústeres a definir en la región y el resultado óptimo fue de cuatro, ya que este número presentó el mayor Índice Resumen (Tabla 35). A través del mapeo de clústeres se obtuvo finalmente el mapa de las sub regiones presentes en la Pampa Medanosa.

Tabla 35. Resultados de los índices empleados en la determinación del número de clústeres (todos a más mejor, excepto el coeficiente de partición).

Variables	I2CM	I3CM	I4CM
XieBeni	1,68E ⁻⁰⁵	1,31E ⁻⁰⁵	2,50E ⁻⁰⁵
FukSug	-1,43E ⁺⁰⁴	-1,94E ⁺⁰⁴	-2,11E ⁺⁰⁴
CoefPart	1,07	1,07	1,11
EntrPart	1,09E ⁻⁰¹	1,18E ⁻⁰¹	1,66E ⁻⁰¹
Índice Resumen	1,68	1,89	2,28

En la Figura 78 se presenta el Mapa de Sub- regiones por Susceptibilidad a la Erosión Eólica (I-IV, I mayor peligro de erosión IV menor peligro de erosión) obtenido mediante el análisis de clústeres.

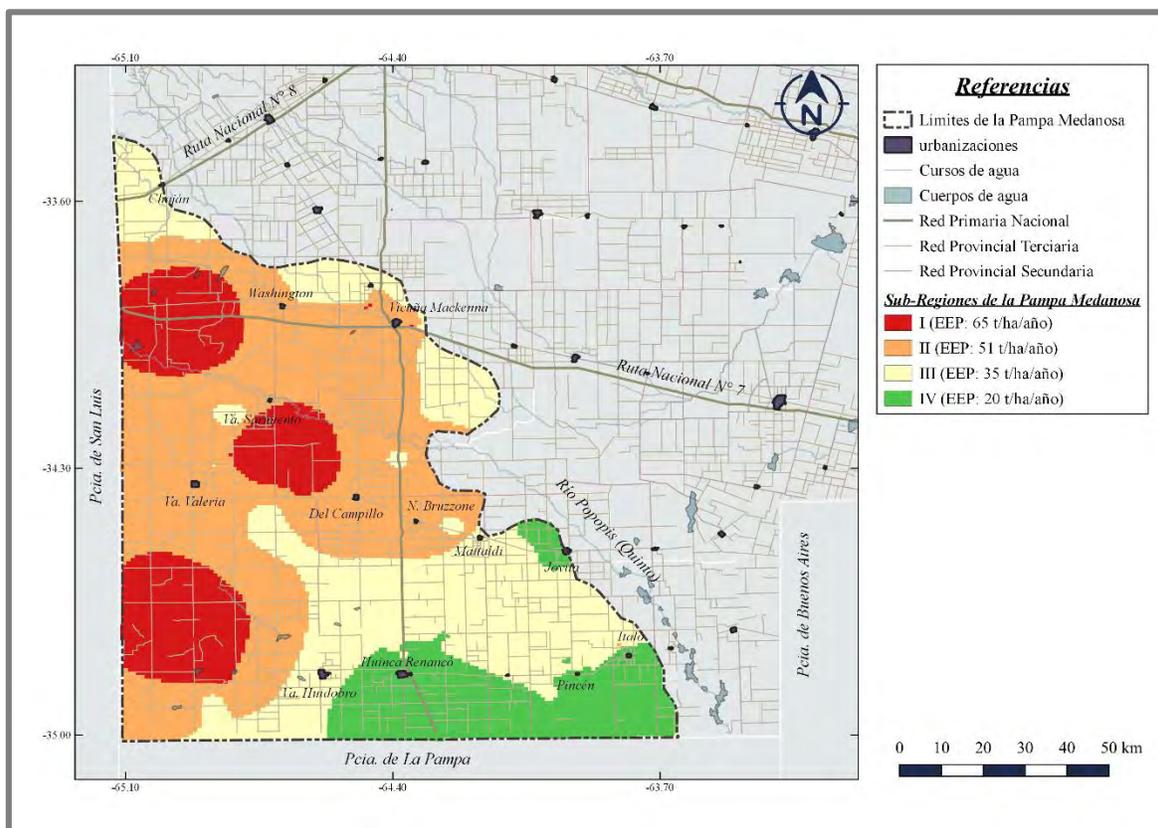


Figura 78. Mapa de Sub-Regiones por Susceptibilidad a la Erosión Eólica de la Región de la Pampa Medanosa.

La Sub-Región I se presenta como el ambiente con mayor susceptibilidad a la erosión, su superficie abarca 231.808,8 ha y representa el 16 % de la Pampa Medanosa, con una tasa de erosión eólica potencial de $65 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. La Sub-Región II fue la que presentó la mayor extensión, 576.801 ha que ocupan el 40 % de la totalidad de la Pampa Medanosa, en este macroambiente la erosión eólica potencial estimada fue a $51 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. La Sub-Región III, con menor susceptibilidad a la erosión eólica que la anterior, cubre 418.251,7 ha y equivale a un 29 % de la superficie regional, con una tasa potencial de pérdida de suelo de $35 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$. Finalmente, la Sub-Región IV fue la que mostró la menor susceptibilidad ser erosionada por el viento, ocupa 189.597 ha -13% de la superficie regional- y que exhibe una tasa de erosión eólica potencial de $20 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Tabla 36).

Tabla 36. Superficie ocupada por las Sub- Regiones (SR) por susceptibilidad a la erosión eólica de la Pampa Medanosa y proporción de la región que representa.

	Superficie (ha)	Superficie (%)	EEP* (t.ha ⁻¹ .año)
SR-I	231.808,8	16,37	65,27
SR-II	576.801,1	40,72	51,23
SR-III	418.251,7	29,53	34,86
SR-IV	189.597,1	13,39	20,29
Sup. Total	1.416.459		

*EEP: erosión eólica potencial calculada como $EEP = 662 - 148 \ln(100 - FE)$ (Eltaif y Gharaibeh, 2011)

En la Figura 79 se aprecia como las geoformas medianosas y los focos de erosión se asocian a las zonas de menor calidad de los suelos, ubicándose principalmente al oeste de la Ruta Nacional N° 35.

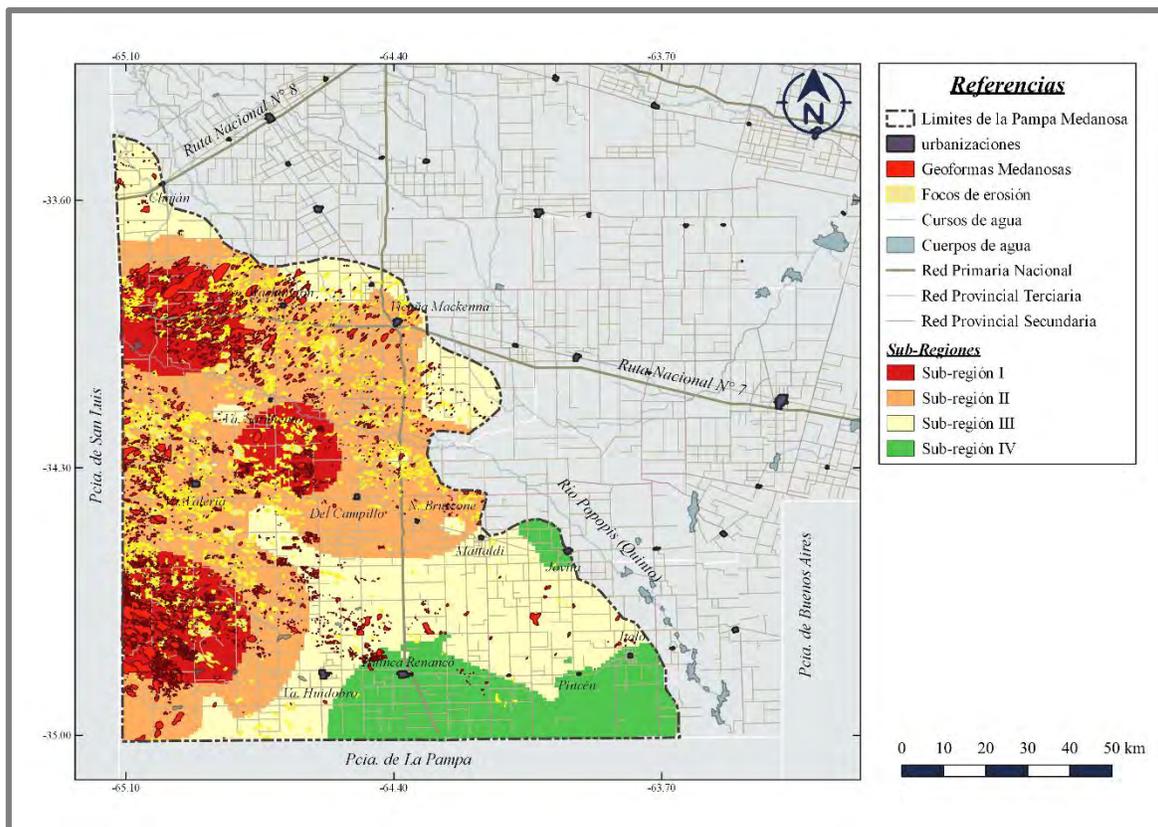


Figura 79. Asociación de las sub-regiones por susceptibilidad a la erosión eólica de la región de la Pampa Medanosa a las áreas medanosas y focos de erosión actuales digitalizados en el Capítulo III.

La erosión implica una menor productividad de la tierra, probablemente por ello, los resultados observados en los mapas de susceptibilidad a la erosión eólica en la Pampa Medanosa muestran una distribución de las áreas de mayor susceptibilidad que se asemeja a la distribución de las tierras de menor productividad presentados en el mapa del Índice de Productividad de la Tierra (Bustos *et al.*, 2019). Este índice, conocido como Índice de Productividad de la Tierra de Riquier (IP), fue adaptado a las variadas condiciones ecológicas e información disponible en la Argentina por Nakama y Sobral (1987), investigadores del Departamento de Evaluación de Tierras (EEA INTA Castelar).

El IP es un sistema paramétrico y multiplicativo propuesto por Riquier, Bramao y Cornet (1970) que se interpreta como una proporción porcentual del rendimiento máximo potencial de los cultivos más comunes de una región, ecotípicamente adaptados, bajo un determinado nivel de manejo; y que resulta de una adaptación del Índice Storie o Índice de Tierra (De la Rosa, 2008). El índice de Storie (IS), es un índice paramétrico multiplicativo desarrollado en California (EE.UU.) cuyo objetivo original fue contribuir a una clasificación impositiva. El Índice de Storie, y por lo tanto también el IP, emplean propiedades intrínsecas del suelo (espesor, textura, drenajes, material parental, acidez, etc.), características de la superficie (pendiente, microrrelieve) y aspectos de conservación (grado de erosión) para expresar la influencia de los factores de suelo en conjunto sobre la productividad de cultivos (Storie, 1976). Establece 6 clases (1,2 y 3 para fines agrícolas; 4 para uso agrícola muy limitado, 5 para pastos y 6 sin uso).

A diferencia del Índice de Storie, el sistema Riquier propone la delimitación de 5 clases de productividad (Vidal *et al.*, 2018):

- Clase I.- Excelente: Valor de IP de 100-65%. Suelos adecuados para todos los cultivos agrícolas.
- Clase II.- Buena: Valor de IP de 64-35%. Suelos adecuados para todos los cultivos agrícolas

- Clase III.- Media: Valor de IP de 34-20%. Suelos marginales para cultivos, árboles no forestales.
- Clase IV.- Pobre: Valor de IP de 19-8%. Suelos adecuados para pastoreo, repoblación forestal, recreo o cultivos especiales.
- Clase V.- Extremadamente pobre: Valor de IP de 7-0%. Suelos no adecuados para el cultivo.

El máximo valor de IP hallado en la Pampa Medanosa fue de 69, la gran mayoría de sus suelos pertenecen a las clases de productividad muy pobre o nula, medianamente pobres y de productividad media. Las tierras de productividad buena (Clase II) se concentran hacia el este (Sub-regiones III y IV), mientras que las de muy pobre o nula productividad (Clase V) coinciden con las áreas de dunas situadas sobre la Sub-región I y algunos ambientes de drenaje restringido. Las tierras de pobre productividad o Clase IV coinciden prácticamente con la Sub-región II (Figura 80 y 81).

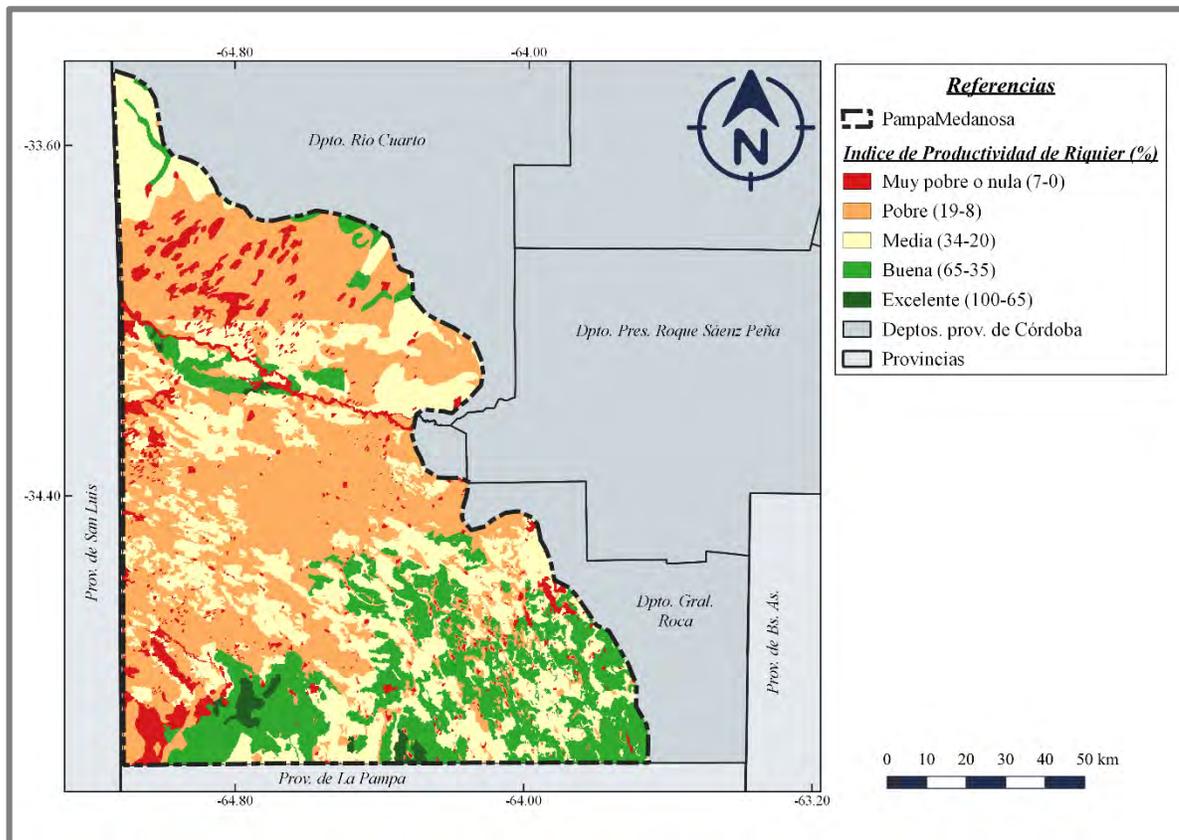


Figura 80. Mapa de valores del Índice de Productividad de Riquier en la región de la Pampa Medanosa Cordobesa (Adaptado de Bustos *et al.*, 2019)

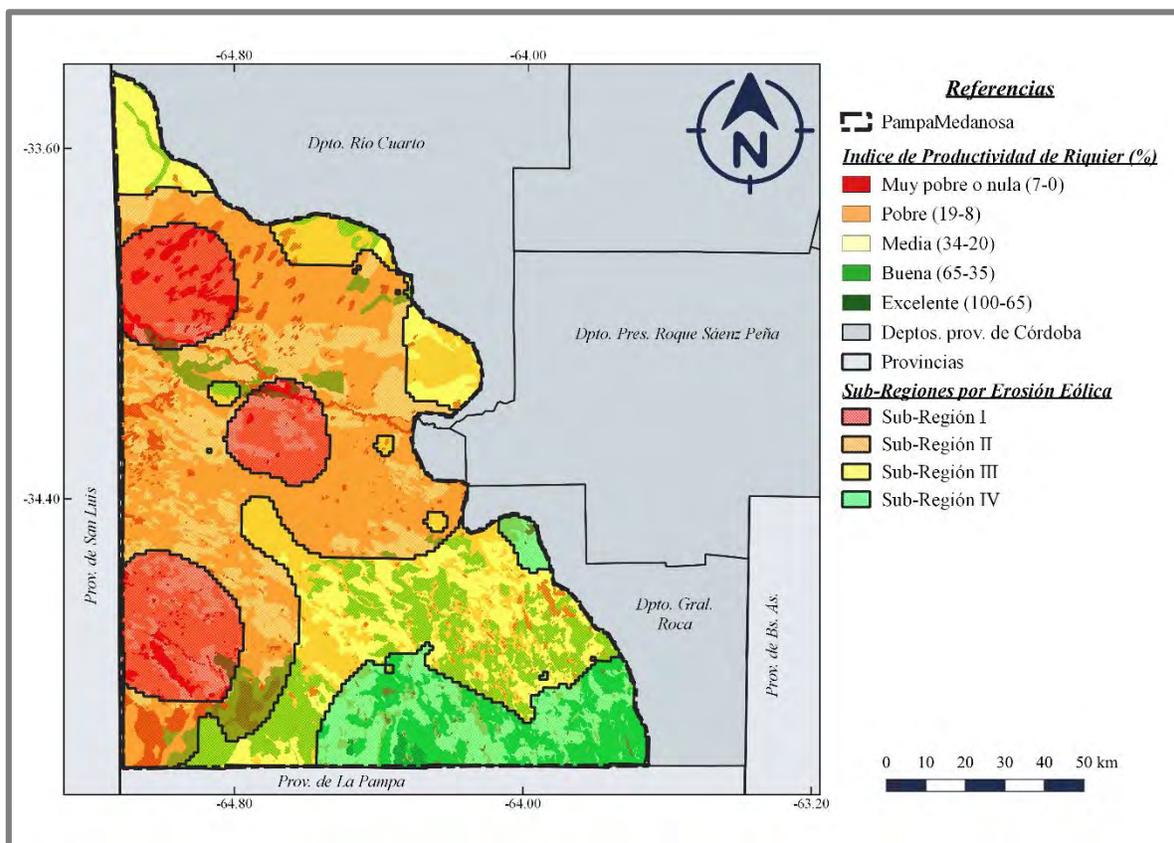


Figura 81. Comparación entre el mapa de valores del Índice de Productividad de Riquier (Adaptado de Bustos *et al.*, 2019) en la región de la Pampa Medanosa Cordobesa, y el mapa de Sub-Regiones por Susceptibilidad a la Erosión Eólica de la Región de la Pampa Medanosa.

3.3. Caracterización de las sub-regiones de la Pampa Medanosa

La variación espacial de los indicadores de calidad de suelo estudiados que permitió la identificación de las sub-regiones (SR) en la Pampa Medanosa, responde a la variabilidad que los factores de formación de los suelos – clima, relieve, material parental, organismos, y tiempo - (Jenny, 1994) muestran en la región. La relación entre los factores de formación y los resultados obtenidos se discute a continuación, adjuntándose al final de este apartado una tabla síntesis con los valores medios de los atributos de suelo estudiados de cada sub-región.

Dentro de la Pampa Medanosa existe cierta variabilidad climática que repercute en los indicadores de calidad del suelo. Respecto de las precipitaciones estas aumentan hacia el

este, del mismo modo que lo hacen las temperaturas, lo que determinó diferencias en el grado de meteorización del material parental, el que logró una mayor meteorización hacia el este de la región, principalmente sobre la SR-IV que recibe mayores aportes de agua por lluvias. Al mismo tiempo, el material originario de origen eólico, sedimentario, fue depositado por vientos de dirección suroeste-noreste, lo que dio lugar a variaciones en la composición textural dentro de la región y ello a su vez implica diferencias en la acumulación de carbono orgánico (CO) (Bosnero *et al.*, 2003; Jarsún *et al.*, 2006). Se observó que la SR-I logra mayores valores de CO que las restantes sub-regiones (14,1 g. kg⁻¹). De las cuatro sub-regiones definidas, la que menor contenido de CO mostró fue la SR- I con un valor de 11, 09 g. kg⁻¹ de CO hasta los 5 cm de profundidad. En ella se hallan los suelos menos evolucionados, de texturas más gruesas y, por lo tanto, menos resistentes a la degradación física; pertenecientes al orden Entisoles donde el impacto del factor tiempo ha sido menor dada la menor edad del material parental eólico (Cantú y Degiovanni, 1984). Estos suelos alcanzan el máximo contenido medio de fracción erodable (FE) de la región que asciende hasta un 44 %, mientras que, la SR-IV presenta el menor valor medio de FE (24%). Estas relaciones son coherentes con el comportamiento de la FE en función del CO descrito en el Capítulo V.

La FE y el CO son los principales en relación a la susceptibilidad a la erosión eólica, y dados los valores que toman en la SR-I en comparación a las restantes SRs, se observó que este macroambiente es el que requiere mayor atención ante el advenimiento de cambios en el uso del suelo y manejos no sustentables. Los valores de erosión eólica potencial (EEP) calculados para la SR-I en función de la FE ascienden a 65 t. ha⁻¹. año⁻¹, algo más de tres veces la EEP de la SR IV (20 t. ha⁻¹. año⁻¹) evidenciando la heterogeneidad espacial de la Pampa Medanosa y la necesidad de aplicar técnicas de prevención y mitigación de la erosión eólica sobre la SR-I adecuando el uso potencial del suelo a su aptitud o capacidad. Un claro signo de la mayor susceptibilidad a la erosión eólica de la SR-I es el agrupamiento de las áreas con mayor densidad de médanos dentro de este macroambiente.

Otra variable climática que difiere a lo largo de la región es la velocidad del viento. Existe un gradiente en las velocidades medias anuales que alcanza el viento que se incrementan hacia el norte. En los sectores correspondientes a los campos de dunas el viento incrementa sus velocidades medias, se presentan los suelos menos evolucionados arenosos y

areno francos de la SR-I, coincidiendo con el sector que recibe menos precipitaciones. En estas texturas y bajo esas condiciones climáticas los procesos de mineralización del humus se intensifican, ello repercute en la condición química, lo que implica que se encuentren aquí suelos menos fértiles y más susceptibles a la degradación física como Ustorthents típicos y Ustipsamments típicos (Bosnero *et al.*, 2003; Zamora *et al.*, 2016). Estos suelos presentan un menor grado evolutivo que los del sector sur-sureste ya que, como se describió en el Capítulo II, la deposición de sedimentos eólicos es más reciente sobre el sector norte del río Quinto, lo que indujo el reinicio de los ciclos de pedogénesis sobre estos sedimentos.

El relieve impacta fuertemente en la calidad del suelo, ya que determina en la distribución del agua recibida tanto por medio de las precipitaciones como por escorrentía, lo que a su vez influye en el aporte de sedimentos y materiales finos. El grado de acumulación de sedimentos, impacta directamente en la textura y en el CO, que inciden sobre la estabilidad estructural que adquieren los suelos y, por consiguiente, sobre el riesgo a la degradación física.

La biota como factor de formación tiene un rol fundamental en la fragmentación, transformación y translocación de materiales orgánicos del suelo. Existe actualmente una variación en el tipo de vegetación que cubre la región, un gradiente del monte nativo de oeste a este (Cisneros *et al.*, 2002; Schneider, 2005) que se fragmenta y disminuye su densidad hasta perderse entre los pastizales y las tierras hoy agrícolas. Hay evidencia de que este gradiente estuvo presente antes de la conquista, aunque cubriendo una mayor superficie que la actual. Algunos autores señalan una mayor concentración de monte sobre las laderas del río Popopis, hacia el oeste de del Campillo y en la zona de la laguna La Amarga (Escudero, 2005; Pérez Zavala *et al.*, 2017). Estas variaciones en las coberturas vegetales han determinado variaciones en los aportes orgánicos y en la estratificación de los mismos, obteniéndose como resultado suelos diferentes, con desiguales grados de melanización, distintos espesores de horizontes A y distintos grados de estructuración y resistencia a la degradación física. Hacia el este donde predominaron los pastizales se desarrollaron Molisoles, más estables frente a la degradación fisicoquímica y biológicamente más fértiles, mientras que, hacia el oeste donde la vegetación nativa fue el monte, predominan suelos del orden Entisoles con una marcada estratificación del CO (Ver Capítulo V).

En la siguiente tabla (Tabla 37), se sintetizan los valores medios de las variables incluidas en la caracterización de las sub-regiones por erosión dentro de la Pampa Medanosa.

Tabla 37. Medidas resumen para las Sub-Regiones (SR) por Susceptibilidad a la erosión eólica de la Región de la Pampa Medanosa.

Zona	Variables*	n	Media	D.E.	Mín.	Máx.
Sub-Región I	ArcLi	2318	32,17	1,87	22,31	37,78
	CO	2318	11,09	0,45	10,17	12,47
	EES	2318	79,69	0,70	66,58	84,00
	FE	2318	43,63	4,06	33,20	57,13
Sub-Región II	ArcLi	5767	32,22	1,82	22,43	40,13
	CO	5767	12,52	0,39	11,40	13,51
	EES	5767	79,73	0,35	66,16	81,20
	FE	5767	38,04	2,21	23,87	45,41
Sub-Región III	ArcLi	4181	32,77	1,77	20,13	43,10
	CO	4181	12,98	0,46	11,79	13,92
	EES	4181	79,76	0,32	71,71	85,84
	FE	4181	30,77	4,20	18,92	38,11
Sub-Región IV	ArcLi	1896	33,46	2,83	21,95	47,74
	CO	1896	14,10	0,69	12,52	15,76
	EES	1896	79,89	0,79	73,83	88,30
	FE	1896	23,61	2,90	15,37	29,72

*Referencias: ArcLi: arcilla más limo (%); CO: carbono orgánico (g.kg⁻¹); EES: estabilidad estructural en seco (%); FE: fracción erodable (%).

3.4. Validación de las sub-regiones

Las sub-regiones halladas dentro de la Pampa Medanosa resultaron ser estadísticamente diferentes para carbono orgánico y fracción erodable. El modelo mixto propuesto para CO indicó que un 78% de la variabilidad entre las sub-regiones fue explicada por un cambio en el CO, mientras que, el modelo establecido para FE indicó que un 84% de la variabilidad entre los macroambientes fue explicada por la FE. El análisis de clústeres ha logrado captar y expresar la variabilidad espacial regional. Se observó que aquellas variables que presentaron una mayor inclinación de la recta de regresión en el gráfico de dispersión de

Moran fueron las que signaron la delimitación de los macroambientes. Se destaca la alta significancia estadística con la que la fracción erodable y del carbono orgánico fueron diferentes entre las sub-regiones (p -valor $<0,0001$), por su importancia en relación a la susceptibilidad a la erosión eólica. La inclusión de variables con baja autocorrelación espacial como ArcLi y EES que expresaron baja capacidad de demarcación de clústeres en la metodología aplicada no contribuyeron a la zonificación.

A continuación, se presentan las tablas del contraste de medias de las subregiones y desvíos estándar en donde se aprecian las diferencias entre las subregiones. El orden creciente de la susceptibilidad a la erosión de las regiones definidas se correspondió con la FE (Tabla 38). El comportamiento inverso se observó en el CO, que mostró mayores contenidos en las regiones menos susceptibles a la erosión (Tabla 39).

Tabla 38. Medias y errores estándar para Fracción Erodable (%) en cuatro sub-regiones (SR) de la Pampa Medanosa.

Zona	Medias	D.E.			
Sub Región I	41,46	4,06	A		
Sub-Región II	36,97	2,21		B	
Sub-Región III	31,88	4,2			C
Sub-Región IV	27,09	2,9			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 39. Medias y errores estándar para Carbono Orgánico (gr.kg^{-1}) en cuatro sub-regiones (SR) de la Pampa Medanosa.

Zona	Medias	E.E.			
Sub-Región IV	14,26	0,69	A		
Sub-Región III	13,06	0,46		B	
Sub-Región II	12,47	0,39			C
Sub-Región I	10,95	0,45			D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4. Conclusiones

La metodología propuesta permitió identificar y explicar las diferencias en cuanto a la susceptibilidad a la erosión eólica intrarregional, dando como resultado un mapa base para futuras áreas de protección/conservación de utilidad para la planificación de manejos de suelos sustentables y políticas ambientales regionales.

Se logró localizar la heterogeneidad presente a través de la interpolación espacial de los principales atributos de calidad de suelo relacionados a la susceptibilidad a erosión eólica.

Se localizó un ambiente más resistente y resiliente, con mayor grado evolutivo y mejor aptitud de uso sobre el sureste de la región, mientras que, sobre el área norte y el área oeste se delimitaron sub-regiones que requieren de especial atención para su protección/conservación.

Los macroambientes identificados fueron cuatro. En primer lugar, la SR-I que fue el macroambiente que mostró la mayor susceptibilidad a la erosión eólica, con los menores valores de CO y el mayor porcentaje de agregados erosionables por el viento. La tasa de erosión eólica potencial estimada para la SR-I fue la mayor de las cuatro y ascendió a 65 t. ha⁻¹. año⁻¹. Se presentó subdividida en tres sectores, que en total suman 231.809 ha y que ocupan aproximadamente 16% de la superficie regional.

La segunda sub-región identificada, SR-II, fue la que presentó mayor extensión, 576.801 ha que representan el 41% de la superficie regional. En este macroambiente la erosión eólica potencial estimada fue de 51 t. ha⁻¹. año⁻¹.

En tercer lugar, fue definida una zona intermedia, SR-III, con menor susceptibilidad a la erosión eólica que abarca 418.251 ha equivalentes a un 29 % de la superficie regional, con tasas de pérdida de suelo potenciales de 35 t. ha⁻¹. año⁻¹. Por último, se delimitó una sub-región que mostró una mayor resistencia a la erosión, la SR- VI, sobre el extremo sur-este, con una superficie de 189.597 ha que representan el 13% de la Pampa Medanosa, cuya tasa de erosión eólica potencial fue de 20 t. ha⁻¹. año⁻¹, la menor de la región. En ella, los suelos son más evolucionados y tienen mayor capacidad de acumular carbono orgánico.

Los resultados de este capítulo han permitido comprender que la Pampa Medanosa es una región heterogénea con suelos de diferentes aptitudes de uso, diferentes también en su



calidad y resistencia a la degradación física. Ello evidencia de que distintas prácticas de manejo y una planificación que tengan en cuenta esta variabilidad ambiental serán requeridas para arribar a un uso agropecuario sustentable, en el que el uso del suelo coincida con su potencial, respetando su aptitud y buscando la mejora de sus indicadores de calidad a través de alternativas de manejo sustentables.

Referencias bibliográficas

- Amidan, B., T. Ferryman, y S. Cooley. (2005). Data outlier detection using the Chebyshev theorem. In IEEE Aerosp. Conf (pp. 3814e3819).
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association e LISA. *Geographical Analysis*, 27, 93e115.
- Anselin, L. (2001). Spatial Effects in Econometric Practice in Environmental and Resource Economics. *Am. J. Agric. Econ.* 83 (3): 705–710.
- Arrouays, D., N. Saby, J. Thioulouse, C. Jolivet, L. Boulonne, & C. Ratié. (2011). Large trends in French topsoil characteristics are revealed by spatially constrained multivariate analysis. *Geoderma*, 161 (3-4), 107-114.
- Bezdek, J. C. (1981). *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*, Plenum Press, New York.
- Bivand, R., T. Keitt, & B. Rowlingson. (2014). rgdal: Bindings for the geospatial data abstraction library. R package version 0.8-16.
- Bivand, R. S., E. J. Pebesma, & V. Gomez-Rubio. (2013). *Applied spatial data analysis with R* (2 ed.): Springer.
- Bivand, W. R. (2018). Comparing implementations of global and local indicators of spatial association. *TEST*, 27(3), 716–748. <https://doi.org/10.1007/s11749-018-0599-x>.
- Bosnero, H. A., V. Pachecoy, B. Jarsun, P. Benicio, M. Carnero, V. Bustos, . . . G. Petropulo. (2003). Cartas de suelo de la República Argentina. Hojas Departamento General Roca, Provincia de Córdoba. En CD. Córdoba, Argentina.: INTA - DACyT.
- Bustos, M.V., E. Fernández, H. Morales. 2019. Índice de Productividad. 1:50.000. Version 1.0. Mapas de Suelos de Córdoba. IDECOR. Disponible en: <http://gn-idecorserver.cba.gov.ar/geoserver/sde/wms>. Recuperado el 20/12/20.
- Cantú, M., y S. Degiovanni. (1984). *Geomorfología de la Región Centro Sur de la Provincia de Córdoba*. Trabajo presentado en 9º Congreso Geológico Argentino, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. Actas IV: 76–92.
- Carignano, C., D. Kröhling, S. Degiovanni, y M. Cioccale. (2014). *Geomorfología*. Trabajo presentado en XIX Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba, Córdoba, Argentina.

- Cisneros, J. M., C. O. Nuñez, J. J. Cantero, A. Degioanni, O. Plevich, M. Cabido, . . . A. Amuchastegui. (2002). Caldenia Cordobesa: Una síntesis florística y ambiental. En: Documento Resumen de la 1º Reunión Nacional para la Conservación de la Caldenia Argentina.. Agencia Córdoba D.A.C.yT. Ciudad de Córdoba. Argentina.
- Córdoba, M. (2014). *Herramientas estadísticas para el monitoreo y uso de la variabilidad espacial del rendimiento y propiedades de suelo intralote*. PhD Tesis, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba Capital, Argentina.
- Córdoba, M., M. Balzarini, C. Bruno, y J. L. Costa. (2012). Identificación de zonas de manejo sitio-específico a partir de la combinación de variables de suelo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 13(1), 47-54.
- Córdoba, M., C. Bruno, F. Aguante, M. Tablada, y M. Balzarini. (2014). Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas. Manual de Buenas Prácticas. Ed. Balzarini, M.Eudecor. Córdoba, Argentina.
- Córdoba, M., C. Bruno, J. Costa, y M. Balzarini. (2016). Variabilidad espacial de suelo a escala de lote y su relación con los rendimientos. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 42(1), 47-53.
- Córdoba, M., P. Pablo, F. Giannini Kurina, C. Bruno, y M. Balzarini. (2019). *Guía para el análisis de datos espaciales. Aplicaciones en agricultura*.
- De la Rosa, D. (2008). Evaluación agro-ecológica de suelos. Mundi-Prensa Libros.
- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada, y C. W. Robledo. (2017). InfoStat (Version 2017). Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Dray, S., D. Bauman, G. Blanchet, D. Borcard, S. Clappe, G. Guenard, . . . H. Wagner. (2020). Multivariate Multiscale Spatial Analysis. R Package 'adespatial'.
- Dray, S., S. Said, y F. Débias. (2008). Spatial Ordination of Vegetation Data Using a Generalization of Wartenberg's Multivariate Spatial Correlation. *Journal of Vegetation Science*, 19, 45-56. doi: 10.3170/2007-8-18312
- Escudero, A. N. (2005). Despuntando historia: Raíces de Del Campillo y zona.
- Fukuyama, Y., y M. Sugeno. (1989). A new method of choosing the number of clusters for the fuzzy c-means method, Proc. 5th Fuzzy Syst. Symp., p. 247-250, 1989.

- Hiemstra, P. H., E. J. Pebesma, C. J. W. Twenhöfel, & G. B. M. Heuvelink. (2009). Real-time automatic interpolation of ambient gamma dose rates from the Dutch radioactivity monitoring network. *Computers y Geosciences*, 35(8), 1711-1721.
- Hijmans, R. J. (2019). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package (Version 3.0-7). En <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Jarsún, B., J. A. Gorgas, E. Zamora, H. A. Bosnero, E. Lovera, A. Ravelo, y J. Tassile. (2006). *Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba: Los Suelos. Nivel de Reconocimiento 1:500.000* Córdoba, Argentina: Agencia Córdoba Ambiente DACYT-SEM, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA Manfredi.
- Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*: Courier Corporation.
- Malone, B. P., B. Minasny, & A. B. McBratney. (2017). *Using R for digital soil mapping*. Switzerland: Springer International Publishing.
- McBratney, A. B., M. L. Mendonça Santos, & B. Minasny. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1), 3-52. doi: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- Meyer, D., E. Dimitriadou, K. Hornik, A. Weingessel, F. Leisch, C.-C. Chang, & C.-C. Lin. (2019). R Package 'e1071' v 1.7-3. Misc Functions of the Department of Statistics, Probability Theory Group (Formerly: E1071), TU Wien.
- Moran, P. (1948). The interpretation of statistical maps. *J. Roy. Stat. Soc. B Method.* 10, 243–251.
- Nakama, V y Sobral, R. 1987. Índice de Productividad. Método paramétrico para la evaluación de tierras. Secretaría de Agricultura, ganadería y Pesca – INTA. Documento del Proyecto PNUD Arg. 85/019. Buenos Aires.
- Pérez Zavala, G., M. Tamagnini, y E. Olmedo. (2017). *La Frontera Sur y los Ranqueles: su historia y proyección*. Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Nacional de Río Cuarto. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. 45 pp.
- Pinheiro, J., y D. Bates. (2004). *Mixed-Effects Models in S and SPLUS*. New York: Springer.
- QGIS Development Team. (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. En <https://qgis.org>.

- R Core Team. (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. En <https://www.R-project.org/>.
- Riquier, J; Bramao, D; y Cornet, J. 1971. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity (first approximation). Soil Resources, Development and Conservation service Land and water Development Division. FAO.
- Schneider, C. F. (2005). Análisis de los patrones de deforestación en el Corredor Biogeográfico del Caldén (Córdoba, Argentina) y su relación con la distancia a caminos, mediante un Sistema de Información Geográfica. (Tesis Grado) Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2007). Primer inventario Nacional de Bosques Nativos. Segunda Etapa. Dirección de Bosques. Subsecretaría de Planificación y Política Ambiental. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. República Argentina. 236 p. .
- Vicondo, M. E., M. I. Genero, R. Haro, y J. C. Colazo. (2016, 2016). *Cultivo de cobertura post maní para controlar la erosión eólica en el S de Córdoba*.
- Vidal, C. A., J. S. Díaz, & C. A. Tomás. (2018). Análisis y valoración de los sistemas de evaluación de suelos en España. Evolución, tendencias actuales y perspectivas futuras. Estudios Geográficos, 58(228), 331-354.
- Webster, R., y M. A. Oliver. (2007). Geostatistics for environmental scientists, 2nd edn. John Wiley and Sons, Chichester UK.
- Xie, L. X., y G. Beni. (1991). Validity measure for fuzzy clustering. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 3(8): 841–847.



CAPÍTULO VIII

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN EÓLICA EN LA PAMPA MEDANOSA: EFECTOS DEL USO Y MANEJO DEL SUELO

1. Introducción

La magnitud de la erosión eólica es principalmente afectada por factores climáticos - precipitaciones y velocidad del viento-, edáficos y de la cobertura vegetal (Fryrear *et al.*, 1994). La intensidad que el proceso alcance es dependiente de la erodabilidad propia de los suelos -facilidad de desprendimiento y transporte de las partículas por acción del viento- y de la erosividad del viento (Rostagno *et al.*, 2004). Las mayores tasas de erosión se registran durante los períodos del año más secos y con mayores velocidades de los vientos, sobre aquellos suelos de texturas con mayor porcentaje de arena (Aimar *et al.*, 2011).

En la región de la Pampa Medanosa, la textura, la fracción erodable y materia orgánica de los suelos son indicadores que difieren entre distintos ambientes dentro de la extensión de la región, y, por consiguiente, la susceptibilidad de los suelos a sufrir erosión eólica dentro de la región varía; como se observó en el Capítulo VII. Sin embargo, este proceso degradativo (o destructivo) no solo depende de las características intrínsecas del suelo, sino que, además, puede ser acelerado por la acción del hombre. El uso y el manejo del suelo y las prácticas no planificadas bajo una visión de sustentabilidad contribuyen significativamente a la degradación del suelo por acción del viento. De aquí surge la importancia de emplear modelos de simulación predictivos, que posibiliten estimar el impacto del uso y manejo del suelo sobre las tasas de erosión, y así desarrollar esquemas de producción sustentables.

A partir de 1954, Chepil y sus colaboradores comenzaron a publicar resultados provenientes del estudio de los procesos físicos de la erosión eólica y del comportamiento e interrelaciones de los factores que en ella participan, desarrollando un modelo empírico capaz de predecir la erosión eólica (Chepil y Woodruff, 1954, 1957; Chepil *et al.*, 1963; Chepil y Woodruff, 1963). Años más tarde, el Servicio de Conservación de Suelos de los EE.UU. presentó la Ecuación de Pérdida de Suelo por Erosión Eólica conocida como WEQ (Wind Erosion Equation, Woodruff y Siddoway, 1965b) que ha tenido una amplia difusión. Posteriormente, esta fue reemplazada por el sistema WEPS –Wind Erosion Prediction System-(Hagen, 1991). El sistema WEPS requiere información muy precisa de clima, con alta frecuencia en la toma de datos, lo que permite obtener estimaciones con una resolución temporal diaria (Wagner, 2013). El alto requerimiento de información climática precisa y

frecuente dificulta su empleo en Argentina, dada la escasa disponibilidad de datos (Aimar *et al.*, 2011). Esta problemática ha sido reportada también para otros países (Klik, 2004).

La ecuación para la predicción de la pérdida de suelo por erosión eólica WEQ (Woodruff y Siddoway, 1965) es un modelo empírico que brinda la posibilidad de estimar tasas anuales de pérdida de suelo por erosión eólica y posee una versión revisada, más actual denominada RWEQ -Revised Wind Erosion Equation- (Fryrear *et al.*, 1998). La WEQ ha sido desarrollada en soporte electrónico y adaptada para la región central de la Argentina por Panebianco y Buschiazzo (2008); tomando el nombre de EWEQ –Ecuación de Pérdida de Suelo por Erosión Eólica en español-.

La EWEQ conserva estructura de factores de la WEQ –erodabilidad potencial, clima, rugosidad, longitud y cobertura vegetal de la superficie expuesta-, pero difiere de la misma en cuanto a su calibración. La información para el cálculo del Factor Climático, que tiene en cuenta la velocidad del viento, las precipitaciones y la temperatura, fue reemplazada por información para la región central de Argentina. La ecuación que hace al factor clima fue modificada también, ya que los autores de la EWEQ, demostraron que las predicciones llevadas adelante empleando este modelo son más sensibles a cambios del factor C explicado por las precipitaciones más que por la velocidad del viento.

Buschiazzo y Zobeck (2008) tras comparar tres de los modelos, comprobaron que en los suelos de la Región Semiárida Pampeana Argentina tanto la RWEQ como la WEPS subestiman la erosión eólica medida a campo, en tanto que la WEQ fue el modelo que mejor ajustó. De acuerdo a estos resultados, y considerando que la EWEQ es más precisa que la WEQ, se prevé que, para los suelos de la región, la EWEQ arrojará resultados más ajustados a las mediciones de campo.

En la Provincia de Córdoba, la introducción de prácticas de manejo sustentables en la agricultura es promovida y adoptada en forma creciente. El Programa de Buenas Prácticas Agropecuarias –BPA- (Ley Provincial 10.663, 2019) incentiva a la introducción de cultivos cobertura (CC) y las rotaciones con gramíneas. En las provincias vecinas existe también un interés creciente por la implementación de prácticas de conservación, promovidas por legislación. En la provincia vecina de San Luis, el impacto de la introducción de los CC es reconocido y la Ley de Protección y Conservación de Suelos de la provincia de San Luis (Ley IX 0315-2004 –reglamentada en 2007-) obliga a la implantación de un cultivo cobertura

luego de la cosecha del cultivo de maní, y dispone un organismo de control para la supervisión de su cumplimiento.

La provincia de la Pampa, posee al igual que San Luis una normativa vigente para la protección de sus suelos, Ley provincial 2.139, que obliga en función de las características edáficas a la realización del cultivo de maní en franjas con otro cultivo protector. Esta condición tiene un efecto directo sobre la velocidad del viento y sobre el factor longitud.

En la provincia de Córdoba, existe el Distrito de Recuperación de Suelos denominado “Córdoba Eólica”, creado en el año 2010, que incluye y excede los límites de la Pampa Medanosa, para el que el Boletín provincial N° 174/2010 en su artículo 3° exige tomar conocimiento de la normativa establecida en el artículo 8° de la Ley Provincial N° 8936 de Conservación de Suelos, que determina, entre otros aspectos, la obligatoriedad de la presentación de planes prediales de recuperación de suelos en forma individual o colectiva, pero no exige prácticas concretas.

La planificación de cortinas forestales no es una práctica común pero la forestación con especies arbóreas ha sido incentivada por la Ley Provincial Agroforestal 10.467 que exige el 2-5% de la forestación de la superficie de los campos y una de las sugerencias de forestación es en forma de cortinas. La disposición de cortinas forestales y de corredores biológicos dentro de los establecimientos podría tener un impacto directo sobre el tamaño de los lotes.

En el Capítulo V, se ha observado que los sistemas agrícolas con maní presentaron la mayor pérdida de carbono orgánico 55% en la capa superficial del suelo, mientras que, en aquellos sistemas de producción mixtos, que incluían al cultivo de maní, mostraron escasa distancia en cuanto al nivel de pérdida de carbono orgánico de suelos con los sistemas agrícolas puros, 44% y 49%, respectivamente. Por otra parte, los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos bajo una menor presión de uso, sin cultivo de maní, presentaron menos reducida la calidad de sus suelos en comparación a aquellos bajo usos agrícolas, mostrando los mayores valores de carbono que sin embargo fueron 37% menores a los suelos bajo montes- situaciones referentes del mínimo deterioro-.

Además, se observó la mayor degradación física en suelos de la Pampa Medanosa bajo agricultura con cultivo de maní, presentando estas situaciones en promedio 72% estabilidad estructural en seco y 33% de fracción erodable, pero, por otra parte, sin embargo,

la agricultura sin maní no fue diferente de aquella con maní estadísticamente. Dada la relación de estos indicadores con la susceptibilidad de los suelos a sufrir erosión eólica, surge la necesidad de analizar si aquellos efectos del cambio de uso sobre estos atributos modifican o no la probabilidad de ocurrencia de erosión eólica en la Pampa Medanosa Cordobesa. Otro interrogante es conocer cuál es la magnitud de las posibles pérdidas de suelo y si superan o no el umbral de pérdida de suelo admisible $8-12 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Woodruff y Siddoway, 1965).

Se hipotetiza que los cambios en el uso del suelo, al reducir los factores rugosidad y cobertura vegetal, podrían producir un incremento en los riesgos de pérdidas de suelo por erosión eólica; y que ello, podría ser estimado mediante el empleo de la EWEQ.

En vista de lo anteriormente expuesto, los objetivos de este capítulo son:

1. Estimar la tasa anual de erosión eólica potencial ante el cambio en el uso y manejo de suelos en la Pampa Medanosa, a través de la simulación de sus rotaciones empleando la EWEQ.
2. Observar si las tasas estimadas superan el umbral de pérdida de suelo tolerable $8-12 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$
3. Comparar las predicciones obtenidas con la EWEQ para los usos y manejos estudiados ante condiciones climáticas contrastantes.
4. Analizar el impacto del cambio en la longitud de los lotes sobre las tasas de erosión empleando la EWEQ.

2. Materiales y métodos

Para llevar adelante las simulaciones dirigidas en el presente capítulo se empleó la EWEQ v 1.1. (Panebianco y Buchiazzi, 2008). La relación funcional general entre la variable dependiente E (el potencial de la pérdida media anual de suelo para una rotación dada) y las variables equivalentes o factores principales responden a la siguiente representación matemática:

Ec. 24

$$E = f(I, K, C, L, V)$$

Donde:

E = pérdida de suelo estimada (t. ha⁻¹. año⁻¹)

f = Indica relaciones no lineales entre los factores.

I = Índice de erodabilidad del suelo (t. ha⁻¹. año⁻¹)

K = Factor de rugosidad de la superficie del suelo

C = Factor clima

L = Factor longitud (m)

V = Factor de cobertura vegetal (kg. ha⁻¹)

El factor I, da cuenta de la erodabilidad potencial máxima del suelo en función de sus propiedades estáticas, inherentes al mismo y a su génesis, particularmente es dependiente de su textura, materia orgánica y la presencia de carbonatos de calcio; estos atributos hacen a su capacidad de agregación.

El factor I se relaciona con el porcentaje de agregados de la superficie del suelo que no son erosionables por el viento –fracción no erodable (FNE), mayores de 0,84 mm de diámetro- que puede determinarse por diferencia a través de la fracción erodable (Ver Capítulo V). Expresa la media anual de pérdida de suelo en toneladas por hectárea de un sitio aislado, plano amplio, carente de rugosidad, sin cobertura, sin costras, suelto.

El I –erosión eólica potencial dada las características intrínsecas del suelo- empleado en el estudio fue el mismo para todas las simulaciones conducidas (I=193; texturas franco

arenosas con 30-50% de arena muy fina y menos de 10% de arcilla), representándose todas las variaciones de uso, clima y manejo sobre un mismo suelo, ya que se pretendió observar el efecto del manejo.

El factor rugosidad (K), representa el efecto de surcos, terrones u otros elementos que alteran la superficie del suelo y absorben parte de la energía del viento oponiendo resistencia al movimiento. En este caso todas las simulaciones fueron planteadas para siembra directa, por su mayor difusión en la región.

El factor vegetación (V) representa la cobertura vegetal tanto verde como seca.

Estos dos factores fueron representados mediante las siguientes rotaciones propuestas para los usos y manejos estudiados:

- A1: Uso agrícola, rotación simulada: Maní-Soja-Soja-Maíz-Maní (Escenario de máximo deterioro).
- A2: Uso agrícola, rotación simulada: Maíz-Cc-Soja-Cc-Soja-Cc-Maíz-Cc-Soja- Cc (Escenario intermedio agrícola).
- Mx1: Uso mixto agrícola-ganadero, rotación simulada: Alfalfa-Maní-Cc-Maíz-VI-Soja-VI-Soja-VI (Escenario intermedio mixto).
- Mx2: Uso mixto agrícola-ganadero, rotación simulada: Alfalfa-Soja-VI-Soja-VI-Maíz-VI-Soja-VI (Escenario de mínimo deterioro).

El factor C representa un índice de erosividad climática de una localidad dada, considera la velocidad del viento y la humedad del suelo. Es un factor que se basa en información estadística y se lo relaciona con el valor 100 asignado a la ciudad de Garden City (Kansas, EE.UU.) donde se desarrolló el modelo.

Para su determinación en la simulación, se emplearon las isolíneas provistas por la EWEQ para tres años distintos para la estación meteorológica de la localidad de Villa Reynolds. Localidad próxima al área con mayor susceptibilidad a la erosión eólica de la Pampa Medanosa (SR-IV, ver Capítulo VII):

- a) un factor C de 2 (año húmedo y poco ventoso),
- b) un factor C de 10 (año “normal”),
- c) un factor C de 150 (año seco y muy ventoso).

El factor L que considera la distancia no protegida a lo largo de la dirección prevaleciente del viento a lo largo de la parcela. Representa la longitud del lote efectiva para que ocurra erosión eólica, sobre todo por saltación. Cuanto más largo es un lote en dirección al viento, mayor cantidad de ciclos de saltación pueden ocurrir, y por lo tanto, mayor será la tasa de erosión. A los fines de evaluar la efectividad de los cultivos en franjas, se simulan dos valores L correspondientes a dos anchos de franja desprotegida (es decir con cultivos) de 100 y 50 m. Se simuló el efecto de la longitud de los lotes más frecuentemente observadas tras la realización del Capítulo IV.

A continuación, se describe la geometría de los lotes y fajas simulados en metros:

- a) L=2000 m, relación L1:L2 = 1:1 (2000 m x 2000 m)
- b) L=1000 m, relación L1:L2 = 1:2 (1000 m x 2000 m)
- c) L=1000 m, relación L1:L2 = 1:1 (1000 m x 1000 m)
- d) L=500 m, relación L1:L2 = 1:2 (500 m x 1000 m)
- e) L=500 m, relación L1:L2 = 1:1 (500 m x 500 m)
- f) L=100 m, lotes con cualquier L2, con franjas de cultivos cada 100 m.
- g) L=50 m, lotes con cualquier L2, con franjas de cultivos cada 50 m.

3. Resultados y discusión

Los valores de erosión eólica estimados mediante el empleo de la ecuación adaptada para la Región Pampeana Semiárida Argentina EWEQ, mostraron variaciones en relación a los usos y manejos suelos de textura media, escenarios climáticos y longitudes de lotes (Tabla 43). Los resultados de las simulaciones efectuadas para cada una de las rotaciones propuestas, ante tres condiciones climáticas contrastantes, mostraron que el escenario de máxima degradación (A1: agrícola con maní y sin cultivos cobertura) fue el que presentó mayores tasas de erosión. Mientras que el modelo no detectó erosión para el escenario de mínimo deterioro (Mx2: mixto agrícola-ganadero sin cultivo de maní y con cultivos de cobertura luego de los cultivos estivales), ante ninguno de los factores climáticos analizados.

La modificación del factor clima (C) mostró un gran impacto en el valor final de la pérdida de suelo por erosión eólica. Los valores de factor C para los tres escenarios presentados en la EWEQ fueron diseñados con valores extremos y por lo tanto son ampliamente contrastantes. Las simulaciones realizadas para las rotaciones agrícolas indicaron que, para los tres valores C analizados, existen pérdidas de suelo por erosión. La rotación A1 presentó las mayores tasas de erosión, como era esperado, ya que fue propuesta como un escenario de máximo deterioro. Un resultado interesante fue que aun cuando la rotación A2 –agrícola sin maní- incluyó cultivos cobertura –CC- luego de cada cultivo estival, se observaron pérdidas de suelo por erosión eólica en años extremadamente secos y ventosos. Situación que sugiere que, ante estas condiciones adversas, la sola inclusión de los CC no sería suficiente para subsanar la problemática de erosión por acción del viento.

El impacto de las rotaciones agrícolas hallado sobre las variables físico-químicas y biológicas analizadas en el Capítulo V, podría estarse viendo reflejado a través del incremento en las tasas de erosión que presenta este uso en contraste con el uso mixto; y muestra la necesidad de implementar prácticas de conservación y prevención del proceso de degradación.

Para A2, en años “normales”, los valores de pérdida de suelo se mantuvieron por debajo del umbral de pérdida de suelo admisible de $8 \text{ t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, que establece que el equilibrio en entre la tasa de erosión geológica y de formación de suelo fluctúa entre 8 y 12 $\text{t. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Woodruff y Siddoway, 1965), mientras que en años desfavorables ($C=150$), la

simulación de la implementación de CC en la rotación agrícola soja-soja-maíz indicó que la práctica no es suficiente para reducir las tasas de erosión por debajo del umbral admisible, inclusive cuando los diseños de lotes o las fajas fueran de menor tamaño. Por otra parte, es necesario tener presente que, en años desfavorables o ante eventualidades climáticas, las tasas de erosión podrían ser diferentes y superiores a las de la simulación, ya que podría verse mermada la producción de materia seca y por consiguiente la cobertura.

Tabla 40. Simulación de la pérdida de suelo por erosión eólica empleando la EWEQ (Panbianco y Buschiazzo, 2008) para cuatro rotaciones diferentes*, en tres años con condiciones climáticas contrastantes (seco-normal-húmedo) - a mayor factor C menos precipitaciones y más velocidad del viento-, ante diferentes geometrías.

	L	1000x1000	1000x2000	2000x2000	500x1000	500x500	100x100	50x100
Rotación	C	Pérdida de suelo por erosión eólica (t/ha/año)						
A1	150	180	183.5	186.9	174.6	167.7	121.7	106.5
	10	9.2	9.6	10.1	8.4	7.6	3.2	2.1
	2	1.7	1.8	2	1.5	1.2	0.2	0.1
A2	150	120.2	123.5	126.5	114.6	108.8	72.4	61.5
	10	5.9	6.3	6.6	5.3	4.6	1.5	0.9
	2	1.1	1.2	1.3	0.9	0.7	0	0
Mx1	150	0.9	1	1	0.9	0.8	0.3	0.2
	10	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0
Mx2	150	0	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0

*Rotaciones: A1 agrícola con cultivo de maní y sin cultivos cobertura; A2: agrícola sin cultivo de maní y con cultivos cobertura; Mx1: mixto agrícola-ganadero con cultivo de maní y con cultivos cobertura; Mx2: mixto agrícola-ganadero sin cultivo de maní y con cultivos cobertura.

Fue posible apreciar el efecto de reducción en las tasas de erosión inducido por el cambio en las dimensiones de los lotes. Este efecto también se observó en la simulación de

la rotación A1- con cultivo de maní y sin CC- que, para años normales, $C=10$, muestra que el umbral se supera en todas las dimensiones propuestas, excepto en las inferiores a 500 m de ancho. Para la región, se observó que es muy común que los lotes superen este valor de ancho (Capítulo IV). El reconocimiento de este valor de ancho de lotes agrícolas por debajo del cual se ve reducida la tasa de erosión a valores inferiores al umbral admisible, podrían resultar de utilidad en la planificación no solo de los lotes dentro de un establecimiento, sino además, para el diseño y localización de cortinas rompevientos o corredores biológicos, ya que, el solo dimensionamiento de los lotes no es suficiente cuando en sus perímetros no se cuenta con ningún tipo de barrera que se interponga al flujo de aire.

Según los resultados de las predicciones obtenidas mediante el empleo del modelo, la modificación de las rotaciones y la implementación del uso mixto adquiere mayor importancia en la reducción de las tasas anuales de pérdida de suelo años secos y ventosos ($C=150$). Inclusive en estos años extremos, el uso Mx2 –mixto sin cultivo de maní y con CC luego de los cultivos estivales, no mostró pérdidas de suelo por acción del viento, constituyéndose en un escenario de prevención de la erosión ideal –escenario de mínima degradación-. Mientras que, los niveles alcanzados por las rotaciones simuladas para uso Mx1, si bien mostraron pérdidas, no alcanzaron el valor umbral. Vicondo *et al.* (2016) han demostrado que la implementación de CC luego del cultivo de maní reduce significativamente la erosión eólica en la localidad de Huinca Renancó. Es necesario mencionar que, los sistemas mixtos simulados en la EWEQ no incluyeron el pastoreo de los rastrojos. Esta práctica suele ser frecuente en los ambientes semiáridos donde se dificulta cubrir los requerimientos del ganado.

Blanco-Canqui y Wortmann (2017) han mencionado que la eliminación de residuos de cosecha reduce la resistencia del suelo a la erosión eólica, ya que se ha observado que retirarlos se asocia a la reducción del tamaño de los agregados. Particularmente, en regiones limitadas por agua, eliminación de rastrojo combinada con fuertes vientos y escasas precipitaciones puede causar degradación del suelo cerca de la superficie. Estos autores mencionan que retención de residuos de maíz a más de 5 t. ha^{-1} son adecuados para reducir riesgos de erosión. El pastoreo de los residuos de cosecha de maíz, reduce el carbono orgánico del suelo, el diámetro de agregados e incrementa la fracción erodable acrecentando los riesgos de erosión eólica (Blanco-Canqui *et al.*, 2016).

Por otra parte, es necesario remarcar, que bajo sistemas mixtos mal manejados y con sobrepastoreo, los suelos de la región, pueden alcanzar niveles de degradación irreversibles, como aquellos eventos mencionados por el Instituto de Suelos y Agrotecnia (1948). El sobrepastoreo podría aumentar el riesgo de erosión eólica en tierras de barbecho, fundamentalmente en años de sequía, ya que en estos años los bajos rendimientos del cultivo producen una cobertura insuficiente (Eltaif y Gharaibeh, 2011).

La tasa de erosión de la simulación para A1 –escenario de máximo deterioro- de los lotes de mayor dimensión -2000 m x 2000 m- en el año más seco, no alcanzó los niveles de las simulaciones presentadas por Aimar (2002) en la provincia de La Pampa. Estos autores obtuvieron tasas de 270 t. ha⁻¹. año⁻¹ en un Ustipsamment, con una pérdida del horizonte «A» equivalente a 21,3 mm.

En la siguiente Figura (Figura 80), es posible observar el nivel de impacto de cada una de los principales factores implicados en la EWEQ que fueron modificados para las simulaciones en este estudio. El mayor impacto se observó al cambiar el uso del suelo, que influye directamente sobre los factores vegetación y rugosidad. Luego se situaron los efectos inducidos por el clima. Y por último las dimensiones de los lotes, que definen el factor longitud.

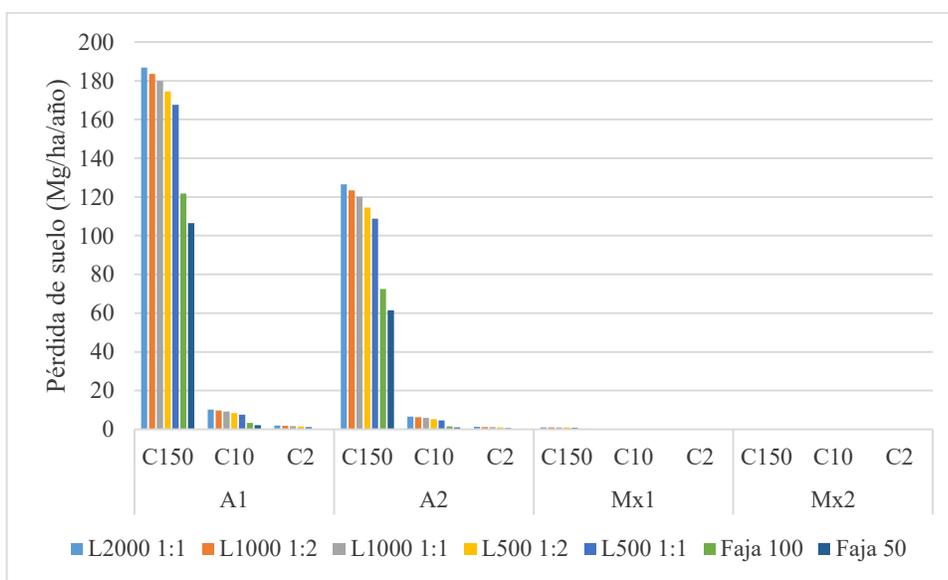


Figura 82. Pérdida de suelo media anual para cuatro rotaciones diferentes (A1: agrícola con maní y sin cultivos cobertura; A2: agrícola sin maní y con cultivos cobertura; Mx1: mixto

agrícola ganadero con cultivo de maní y con cultivos cobertura; Mx2: mixto agrícola ganadero sin cultivo de maní y con cultivos cobertura), ante tres escenarios climáticos diferentes (C2, C10, C150), para lotes de diferente geometría y fajas de 100 y 50 metros.

La pérdida de suelo acumulada en 4 años de la rotación A1 en un lote de 2000 m por 2000 m, son equivalentes a 5,75 cm de horizonte «A» (simulación para una densidad aparente del suelo de $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$), ante un factor climático igual a 150 –año seco y ventoso-. Mientras que, para un factor climático de 10 –año “normal”-, la reducción equivale a 3,1 mm. El cambio en el diseño del lote redujo las pérdidas de horizonte «A» a 5,16 cm en años secos y a 2,35 mm en años “normales”. El cambio en el diseño de la rotación –Mx1- incluyendo no solo CC sino además pasturas perennes, sugiere que es posible la realización del cultivo de maní en la región con pérdidas de suelo acumuladas de $4,1 \text{ t. ha}^{-1}$ inferiores al umbral admisible y equivalentes 0,3 mm de horizonte «A» en años secos y ventosos, en lotes de 2000 m de lado. Esto podría indicar que una planificación adecuada de la rotación de cultivos tiene un impacto positivo sobre las pérdidas de suelo, mayor inclusive que el diseño de los lotes, permitiendo subsanar la problemática de la erosión eólica aun en años desfavorables.

La rotación A2- sin cultivo de maní y con CC- mostró pérdidas de suelos equivalentes a 3,4 cm de horizonte «A» en años secos, y de 2 mm en años normales, en lotes de 2000 m de lado. La pérdida mostrada por la simulación para años secos, en lotes de 500 m de lado se redujo a 3,3 cm. Las predicciones indican que, si bien la realización de agricultura sin maní y con CC podría disminuir las tasas de erosión anuales por debajo del umbral admisible, la inclusión de pasturas perennes en las rotaciones sería capaz de resultados muy superiores aun cuando en la rotación participara el cultivo de maní.

En las siguientes figuras puede apreciarse que la atención sobre el diseño de los lotes resulta con un mayor impacto sobre años con condiciones adversas –secos y ventosos-. La reducción del ancho a valores por debajo de 500 m tiene efectos en tres de las de las cuatro rotaciones analizadas (Figuras 81, 82 y 83). Sin embargo, el efecto de la modificación de las dimensiones, tiene efectos más marcados en los años en que las condiciones climáticas predisponen a la erosión, del mismo modo que la planificación en fajas. En años normales,

si bien se aprecia el efecto, este es menos notorio. En años húmedos no se aprecia un efecto claro de los cambios en la geometría de los lotes.

Ante situaciones mixtas agrícola ganadera sin cultivo de maní, no se observan incrementos en las tasas de erosión ante el incremento de las dimensiones de los lotes.

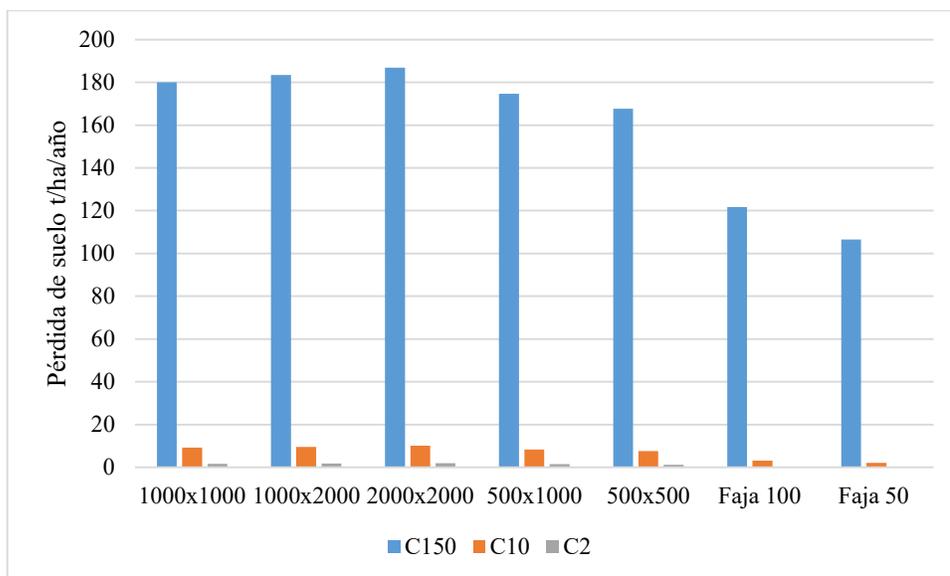


Figura 83. Variación de la pérdida de suelo por erosión eólica en lotes de diferentes dimensiones (L) bajo agricultura con cultivo de maní empleando la EWEQ, ante tres escenarios climáticos contrastantes (C:150 año extremo seco y ventoso; C10: año normal; C2: año húmedo) y para un mismo suelo.

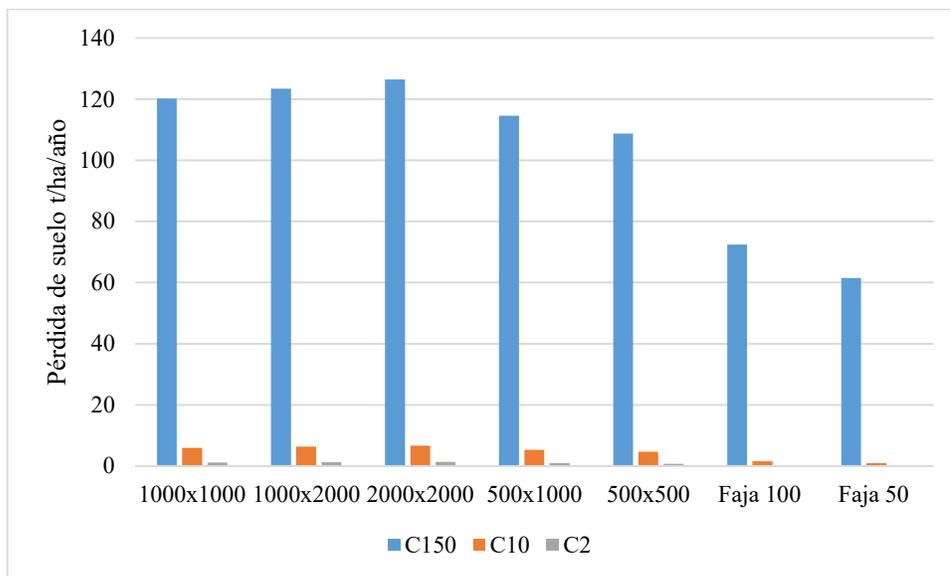


Figura 84. Variación de la pérdida de suelo por erosión eólica en lotes de diferentes dimensiones (L) bajo agricultura sin cultivo de maní empleando la EWEQ, ante tres escenarios climáticos contrastantes (C:150 año extremo seco y ventoso; C10: año normal; C2: año húmedo) y para un mismo suelo.

Es necesario destacar que, en la región, la realización de CC luego de cultivos estivales diferentes del maní no está ampliamente difundida. Algunos productores han destacado la importancia de la realización de CC previos a maíces tardíos, práctica que se ha incrementado dada la variabilidad climática regional interanual que dificulta situar el período crítico de maíz en una ventana de tiempo libre de estrés hídrico. En el presente estudio, las simulaciones fueron realizadas para siembras de primera, por lo que la fecha de siembra podría ser otra variable a tener en cuenta ya que se postergaría en el tiempo el logro del 30% de cobertura y se ampliaría la ventana de exposición del suelo a la erosión por viento.

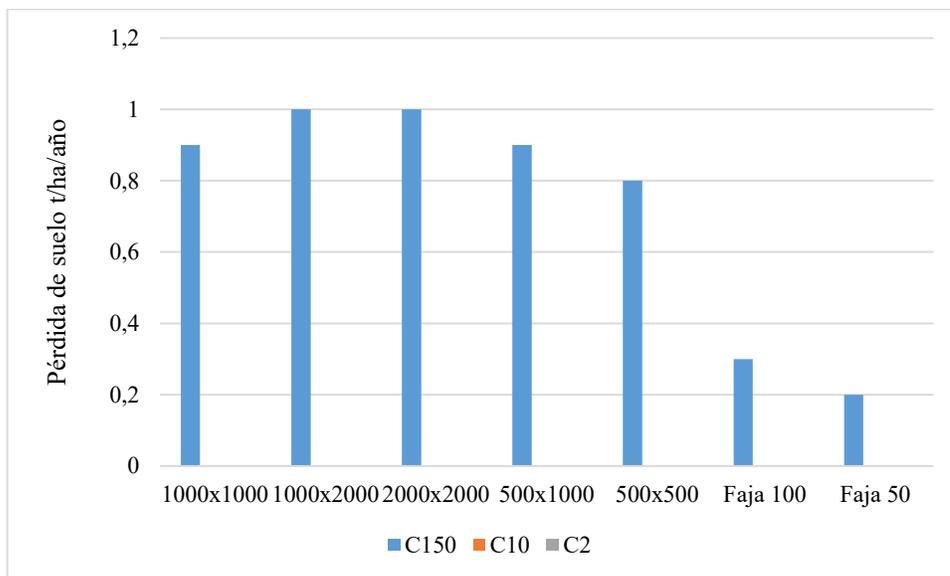


Figura 85. Variación de la pérdida de suelo por erosión eólica en lotes bajo sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos sin cultivo de maní e incluyendo cultivos de cobertura, ante diferentes factores L –longitud- empleando la EWEQ, ante tres escenarios climáticos contrastantes (C:150 año extremo seco y ventoso; C10: año normal; C2: año húmedo) y para un mismo suelo.

Colazo *et al.* (2017) y Genero y Colazo (2019) indicaron que las implantaciones de CC previas al arrancado del maní son eficientes para controlar la erosión desde agosto en adelante, mientras que las siembras luego de la cosecha lo hacen a partir de septiembre, cuando alcanzan niveles de cobertura mayores al 30%. Los resultados de estos autores coinciden con lo hallado al realizar las simulaciones mediante la EWEQ.

La rotación mixta con cultivo de maní y pasturas pareciera ser la mejor alternativa para la realización del cultivo de maní en la región reduciendo las pérdidas de suelo por debajo de los niveles tolerables 8-12 t. ha⁻¹. año⁻¹.

En algunos sistemas de producción, forrajes o pastos perennes son usados en las rotaciones como amortiguadores, herramientas de conservación que permiten proteger suelos susceptibles a la erosión (Blanco-Canqui y Wortmann, 2017), brindándole al suelo un período de recupero.

Los resultados de las simulaciones para las diferentes geometrías propuestas, aun en el escenario climático de condiciones desfavorables, no alcanza los valores umbrales por encima de los cuales la pérdida de suelo anual supera la tasa de formación.

La realización del cultivo de maní en combinación con pasturas perennes en sistemas de producción mixtos agrícola ganaderos resulta entonces una alternativa que podría dar respuesta a la problemática de la erosión eólica en años desfavorables en la Pampa Medanosa.

Sin embargo, sería necesario realizar mediciones a campo para evaluar el ajuste del modelo a las condiciones reales de la Pampa Medanosa. No se tienen registros de mediciones a campo para el área del estudio en pasturas perennes, lo que deja abierta una nueva línea de investigación, ya que su impacto en la reducción de las tasas de erosión según el modelo de simulación podría ser de excelente utilidad en áreas extremadamente susceptibles.

Los resultados obtenidos a partir del empleo de la EWEQ han indicado que el período de mayor pérdida para la rotación A1 es aquel comprendido entre octubre y diciembre (Figura 84). Para A2, el comprendido entre agosto y diciembre (Figura 85), para Mx1 entre octubre y diciembre (Figura 86). Esto coincide con lo mencionado por Mendez y Buschiazzo (2015) quienes sitúan el período de mayor susceptibilidad en primavera, época en la cual los vientos son más intensos. Mientras que para Mx2 no se registraron picos de erosión en la simulación.

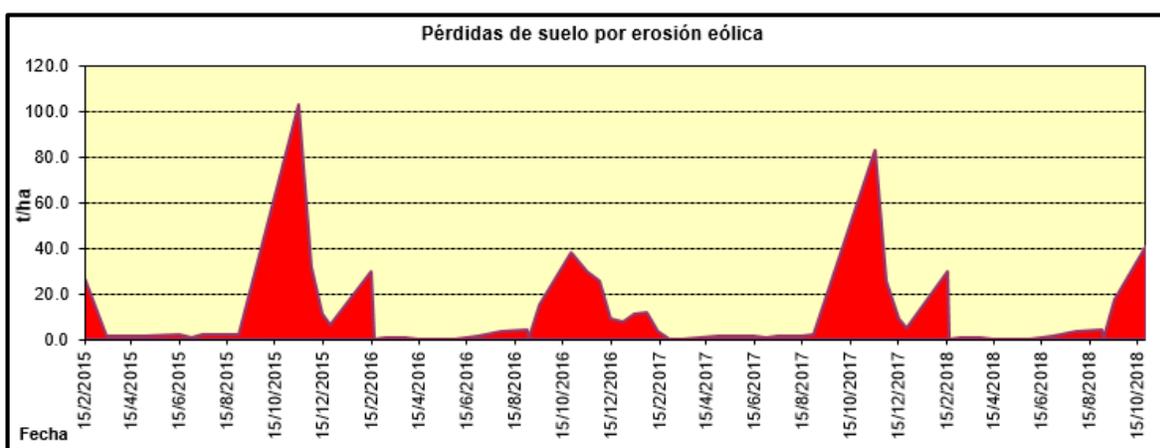


Figura 86. Pérdida de suelo potencial por erosión eólica para la rotación agrícola con maní (A1) simulada en un lote de 500 m de ancho por 1000 m de largo, sobre un suelo de textura media, bajo un Factor Clima de 150. Gráfico obtenido mediante EWEQ 1.1.

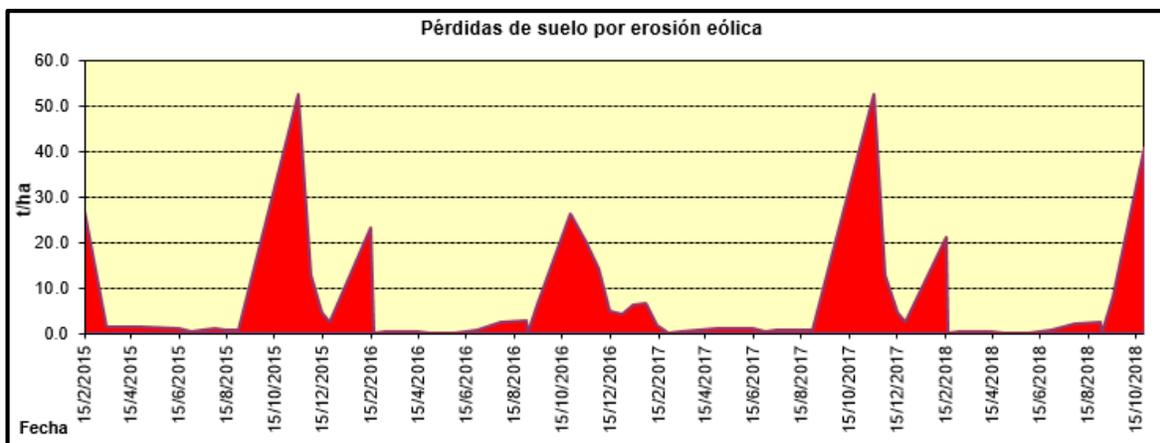


Figura 87. Pérdida de suelo potencial por erosión eólica para la rotación agrícola sin maní (A2) simulada en un lote de 500 m de ancho por 1000 m de largo, sobre un suelo de textura media, bajo un Factor Clima de 150. Gráfico obtenido mediante EWEQ 1.1.

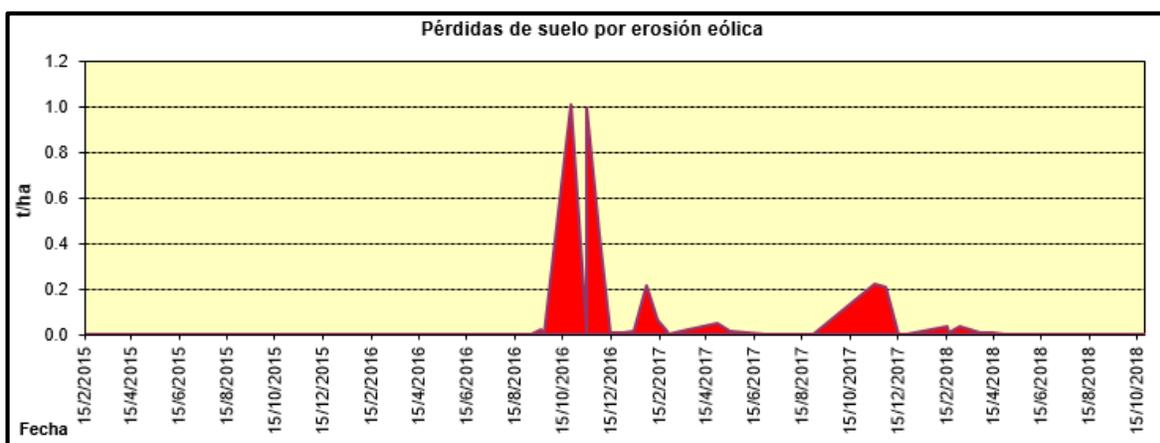


Figura 88. Pérdida de suelo potencial por erosión eólica para la rotación mixta agrícola ganadera con cultivo de maní (Mx1) simulada en un lote de 500 m de ancho por 1000 m de largo, sobre un suelo de textura media, bajo un Factor Clima de 150. Gráfico obtenido mediante EWEQ 1.1.

4. Conclusiones

El empleo de la EWEQ permitió comparar las rotaciones propuestas y orientar sobre la selección de alternativas sustentables. La implementación de prácticas simples como el cambio en el dimensionamiento de los lotes, la introducción de cultivos cobertura y la planificación de las rotaciones podrían ser técnicas sencillas de fácil aplicabilidad, pero con gran impacto en la reducción de las tasas de pérdida de suelos por erosión eólica.

La rotación agrícola con cultivo de maní y sin cultivos cobertura, presentó las mayores tasas de erosión, superando ampliamente el valor umbral de pérdida de suelo admisible por hectárea por año.

La rotación agrícola sin maní que incluyó cultivos cobertura luego de cada cultivo estival, mostró pérdidas de suelo por erosión eólica superiores al umbral solo en años extremadamente secos y ventosos, sugiriendo que, ante estas condiciones adversas, la sola inclusión de esta técnica no sería suficiente para subsanar la problemática.

La modificación de las rotaciones y la implementación del uso mixto adquiere mayor importancia en la reducción de las tasas anuales de pérdida de suelo años secos y ventosos.

Inclusive en estos años extremos, el uso mixto sin cultivo de maní y con cultivos cobertura luego de los cultivos estivales, no mostró pérdidas de suelo por acción del viento.

Los niveles de erosión alcanzados por las rotaciones simuladas para uso mixto agrícola-ganadero con cultivo de maní y cultivos cobertura no alcanzaron el valor umbral.

Llevar adelante la producción de maní en sistemas mixtos con pasturas perennes se presenta como una alternativa que podría solventar la problemática de la erosión eólica en años desfavorables en la Pampa Medanosa.

Sería recomendable seguir investigando en este sentido y comparar los resultados de la EWEQ con valores de campo para conocer el ajuste de la ecuación a los valores de campo.

Referencias bibliográficas

- Aimar, S. B. (2002). Estimaciones cualitativas y cuantitativas de pérdidas por erosión eólica en suelos de la Región Semiárida Pampeana Central. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. 143pp.
- Aimar, S. B., M. J. Méndez, y D. E. Buschiazzo. (2011). Predicción de la erosión eólica potencial con el modelo EWEQ en dos suelos loésicos: efectos de las condiciones climáticas.
- Blanco-Canqui, H., J. Tatarko, A. L. Stalker, T. M. Shaver, & S. J. van Donk. (2016). Impacts of corn residue grazing and baling on wind erosion potential in a semiarid environment. *Soil Science Society of America Journal*, 80(4), 1027-1037.
- Blanco-Canqui, H., & C. Wortmann. (2017). Crop residue removal and soil erosion by wind. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(5), 97A-104A.
- Buschiazzo, D. E., & T. M. Zobeck. (2008). Validation of WEQ, RWEQ and WEPS wind erosion for different arable land management systems in the Argentinean Pampas. *Earth surface processes and landforms*.
- Chepil, W. S., F. H. Siddoway, & D. Armbrust. (1963). Climatic Index of Wind Erosion Conditions in the Great Plains 1. *Soil Science Society of America Journal*, 27(4), 449-452.
- Chepil, W. S., & N. P. Woodruff. (1954). Estimations of wind erodibility of field surfaces. *J. Soil Water Conserv*, 9(257-265), 285.
- Chepil, W. S., & N. P. Woodruff. (1957). Sedimentary characteristics of dust storms; Part II, Visibility and dust concentration. *American Journal of Science*, 255(2), 104-114.
- Chepil, W. S., & N. P. Woodruff. (1963). *The Physics of Wind Erosion and its Control*. *Advances in agronomy* (Vol. 15, pp. 211-302): Elsevier.
- Cisneros, J. M., O. Giayetto, C. Cholaky, G. Cerioni, A. Cantero, y M. Uberto. (2006). Suelos, rotaciones y labranzas. En E. Fernández y O. Giayetto (Eds.), *El Cultivo del Maní en Córdoba* (1 ed., pp. 280). Río Cuarto, Córdoba, Argentina: Fundación de la Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Colazo, J., M. Genero, C. Álvarez, y M. Vicondo. (2017). Eficiencia de control de la erosión eólica de cultivos de cobertura luego de maní en el sudoeste de Córdoba. En: *Actas*

- de las III Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y II Taller de Cartografía Digital.
- Colazo, J. C. (2015). Erosión eólica en siembra directa. Algunos resultados. Disertación. XXIII Congreso Aapresid «Biosapiens. La era del suelo». Recuperado de <https://www.aapresid.org.ar/blog/erosion-eolica-en-siembra-directa-algunos-resultados/> 24/06/2020.
- Colazo, J. C., & D. E. Buschiazzo. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159(1), 228-236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.07.016>
- Eltaif, N. I., y M. A. Gharaibeh. (2011). Aplicación de un modelo matemático para predecir y reducción de la erosión eólica en tierras áridas no protegidas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(SPE), 195-206.
- Fryrear, D., A. Saleh, J. Bilbro, H. Schomberg, J. Stout, & T. Zobeck. (1998). Revised Wind Erosion Equation (RWEQ). Technical Bulletin 1, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory, Wind Erosion and Water Conservation Research Unit, USDA-ARS.
- Fryrear, D. W., C. A. Krammes, D. L. Williamson, & T. M. Zobeck. (1994). Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of soil and water conservation*, 49(2), 183-188.
- Genero, M. I., y J. C. Colazo. (2019). Implantación y eficiencia de control de la erosión eólica de cultivos de cobertura luego de maní en el Sur de Córdoba. Trabajo presentado en XXXIV Jornada Nacional del Maní, General Cabrera, Córdoba, Argentina.
- Hagen, L. (1991). A wind erosion prediction system to meet users need. *Journal of Soil and Water Conservation* 46: 106–111.
- Instituto de Suelos y Agrotecnia. (1948). La erosión eólica en la región Pampeana y plan para la conservación de los suelos. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Agricultura de la Nación.
- Iriondo, M. H. (2010). *Geología del Cuaternario de Argentina*. Argentina: Editorial Moglia.
- Klik, A. (2004, 2004). Wind erosion assessment in Austria using wind erosion equation and GIS.



- Lyles, L., & J. Tatarko. (1988). Soil wind erodibility index in seven north central states. *Transactions of the ASAE*, 31(5), 1396-1399.
- Mendez, M., & D. Buschiazzo. (2015). Soil coverage evolution and wind erosion risk on summer crops under contrasting tillage systems. *Aeolian Res.* 16: 117 – 124.
- Panebianco, J. E., & D. E. Buschiazzo. (2008). Wind erosion predictions with the Wind Erosion Equation (WEQ) using different climatic factors. *Land Degrad. Dev.* , 19, 36-44.
- Rostagno, C. M., H. F. Del Valle, y D. Buschiazzo. (2004). La erosión eólica. Peligrosidad Geológica en Argentina. ASAGAI. 12 pp.
- Skidmore, E., P. Fischer, & N. P. Woodruff. (1970). Wind erosion equation: Computer solution and application. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34:931-935.
- Skidmore, E. L., y J. R. Williams. (1991). Modified EPIC wind erosion model. *Modeling plant and soil systems*, 31, 457-469.
- USDA-NRCS. (2002). *National Agronomic Manual* (3 ed.). Washintong DC.
- Vicondo, M. E., M. I. Genero, R. Haro, y J. C. Colazo. (2016, 2016). Cultivo de cobertura post maní para controlar la erosión eólica en el S de Córdoba.
- Wagner, L. E. (2013). A history of wind erosion prediction models in the United States Department of Agriculture: The Wind Erosion Prediction System (WEPS). *Aeolian Research*, 10, 9-24.
- Woodruff, N. P., & F. H. Siddoway. (1965). A wind erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29 (5), 602-608.

CONCLUSIONES GENERALES

Los procesos de erosión eólica y de desertificación se han reactivado en la Pampa Medanosa. Se identificaron sectores de dunas de génesis holocena y de megadunas más antiguas, en total suman 73.671,6 hectáreas que indican que un 5 % de la superficie total de la región son ambientes que requieren controles, regulaciones y restricciones para la protección/conservación, atendiendo su fraccionamiento por el uso agrícola y la deforestación en el corredor biogeográfico del Caldenal. Por otro lado, se identificaron 66.448 hectáreas de focos de erosión eólica, confirmando que un 4,75% del total de la superficie de la región presenta reactivación de procesos erosivos de tipo eólicos, señalando la necesidad de rehabilitar las tierras degradadas y evitar el avance hacia la desertificación.

La superficie dedicada a la agricultura ha continuado incrementándose en la Pampa Medanosa por sobre las actividades mixtas agrícola-ganaderas desde 2006/07 hasta la actualidad, con un incremento de los cultivos de grano anuales estivales fundamentalmente sobre superficie de pasturas. La superficie de pasturas exhibió una reducción del 50% en 2019 relativa a 2007. El cultivo que más modificó su superficie en el período analizado fue el maní, con un incremento de 395% en 2017 relativo a diez años atrás. El análisis realizado fue sensible a la caída en superficie que expresó este cultivo en 2019. Los cultivos predominantes fueron soja en primer lugar y maíz en segundo lugar. Se observó una disminución del 34% de especies arbóreas en 2019 relativo a 2007.

El reemplazo de los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos por sistemas puramente agrícolas, y la introducción del cultivo del maní en la Pampa Medanosa, afectó los indicadores de calidad de sus suelos y atributos relacionados con la erosión eólica. La mayoría de los indicadores evaluados reflejaron un deterioro en la calidad de los suelos mostrando sensibilidad a los usos agropecuarios estudiados, sugiriendo además que el uso actual ejerce una alta presión sobre el recurso, sobrepasando las capacidades de su uso potencial. Los sistemas de producción mixtos agrícola-ganaderos bajo una menor presión de uso, sin cultivo de maní, han visto menos reducida la calidad de sus suelos en comparación a aquellos bajo usos agrícolas. Los sistemas agrícolas con maní presentaron la mayor pérdida de carbono orgánico 55% en la capa superficial del suelo. Aquellos sistemas de producción

mixtos con cultivo de maní, mostraron escasa distancia en cuanto al nivel de pérdida de carbono orgánico con los sistemas agrícolas puros, 44% y 47%, respectivamente, relativos a las situaciones naturales. Situaciones mixtas sin cultivo de maní, tuvieron un mejor comportamiento de los indicadores físicos- fracción erodable, estabilidad estructural en seco.

No se observaron efectos del uso y manejo del suelo sobre el pH, los valores encontrados no presentan dificultades para la producción de cultivos regionales. Ambos sistemas mixtos superaron en su CIC a los agrícolas (10,4 Cmol.kg^{-1} y 8,8 Cmol.kg^{-1} , respectivamente, de 0-5 cm). Todos los usos fueron inferiores a la condición natural (12,58 Cmol.kg^{-1}). No se observó efecto de la introducción del cultivo de maní sobre esta variable. El uso y manejo del suelo explicó las variaciones encontradas en las concentraciones de Ca, Mg y K. El uso mixto sin cultivo de maní mostro mayor disponibilidad en las tres bases estudiadas a las tres profundidades incluidas en el análisis.

Los sistemas mixtos exhibieron reducciones en la concentración de fósforo extractable de entre 27 y 30% relativas a la situación de referencia de a mínima degradación. Mientras que los sistemas agrícolas sin y con maní presentaron reducciones del 50 y 60% respectivamente, para la capa de 0-5 cm. La reducción del P en los sistemas agrícolas con maní se incrementa con la profundidad, mostrando pérdida de 73 % de 5-10 cm y 77% 10-20 cm. En esta situación de uso, el P mostro valores superiores al nivel crítico para los cultivos regionales solo en la capa de 0-5 cm. Se observó la importancia del muestreo estratificado, que permitió apreciar la variabilidad que tienen los suelos del estudio dentro de un mismo horizonte.

Las situaciones con mayor susceptibilidad a erosión por acción del viento, evaluadas a través de la fracción erodable, la estabilidad estructural en seco y la materia orgánica, mostraron además las menores dotaciones de bases intercambiables y P, situación que podría sugerir la existencia de procesos de retroalimentación entre indicadores biológicos (carbono orgánico), físicos (fracción erodable – estabilidad estructural en seco) y químicos (bases intercambiables y capacidad de intercambio catiónico).

Los resultados sugieren que no es solo la inclusión del cultivo de maní en la rotación el único factor responsable de la degradación física identificada en los suelos agrícolas regionales, sino que es necesario atender la composición de la rotación y hacer observaciones a un plazo de tiempo mayor.

Los indicadores con mayor sensibilidad al cambio de uso de del suelo en el área medanosa del sur de Córdoba resultaron ser la capacidad de intercambio catiónico, el carbono orgánico total, la fracción erodable y el potasio.

El set mínimo resultó compuesto por dos indicadores relacionados con la susceptibilidad a la erosión eólica carbono orgánico y fracción erodable. Su empleo al comparar sistemas de producción mixtos y agrícolas reales fue capaz de detectar diferencias entre los sistemas.

La Pampa Medanosa es un ambiente heterogéneo que puede ser subdividido en ambientes con diferente susceptibilidad a la erosión eólica. Los suelos del sector sur-este de la región presentan mayor estabilidad y resiliencia. Mientras que sobre el área norte y el área oeste se tienen sectores que requieren de especial atención para su protección/conservación.

Se identificaron cuatro sub-regiones (SR). Un ambiente de mayor resistencia a la erosión SR-I (258.700 has) que representa el 18% de la Pampa Medanosa, cuya tasa de erosión eólica potencial es 21,6 t. ha⁻¹. año⁻¹, con suelos más evolucionados, mejor provistos de nutrientes y con mayor capacidad de acumular carbono orgánico. Un segundo ambiente denominado SR-II (496.900 has) que representa el 35% de la superficie regional cuya erosión eólica potencial asciende a 41,2 t. ha⁻¹. año⁻¹. Luego otra zona intermedia, la SR-III (445.000 ha) con mayor susceptibilidad a la erosión eólica (EEP: 50,9 t. ha⁻¹. año⁻¹) y una extensión equivalente al 31% de la superficie regional. Y, por último, una sub-región que mostró la mayor susceptibilidad ser erosionada por el viento, la SR-IV, que se subdivide en dos sectores que suman 215.600 has -15% de la superficie regional- y que exhibe la mayor tasa de erosión eólica potencial de la Pampa Medanosa (66,5 t. ha⁻¹. año⁻¹).

El empleo de la EWEQ permitió comparar las rotaciones propuestas y orientar sobre la selección de alternativas sustentables. La rotación agrícola con cultivo de maní y sin cultivos cobertura, presentó las mayores tasas de erosión, superando ampliamente el valor umbral 8-12 toneladas de pérdida de suelo admisible por hectárea por año. La rotación agrícola sin maní que incluyó cultivos cobertura luego de cada cultivo estival, mostró pérdidas de suelo por erosión eólica superiores al umbral solo en años extremadamente secos y ventosos, sugiriendo que, ante estas condiciones adversas, la sola inclusión de esta técnica no sería suficiente.



La modificación de las rotaciones y la implementación del uso mixto adquiere mayor importancia en la reducción de las tasas anuales de pérdida de suelo años secos y ventosos. Inclusive en estos años extremos, el uso mixto sin cultivo de maní y con cultivos cobertura luego de los cultivos estivales, no mostró pérdidas de suelo por acción del viento.

Los niveles de erosión alcanzados por las rotaciones simuladas para uso mixto agrícola-ganadero con cultivo de maní y cultivos cobertura no alcanzaron el valor umbral. Llevar adelante la producción de maní en sistemas mixtos con pasturas perennes se presenta como una alternativa que podría contribuir a subsanar la problemática de la erosión eólica en años desfavorables en la Pampa Medanosa.

ANEXO I

Tabla 41. Fechas de las escenas Landsat 5 TM y 8 OLI empleadas en la clasificación supervisada.

<i>Año</i>	<i>Path/Row</i>	<i>Día</i>	<i>Mes</i>
2007	228084	24	3
	229083	11	2
	229084	11	2
2008	228084	23	2
	229083	1	3
	229084	1	3
2015	228084	10	2
	229083	1	2
	229084	16	1
2017	228084	15	2
	229083	22	2
	229084	6	2
2019	228084	5	2
	229083	27	1
	229084	12	2

Tabla 42. Matrices de confusión derivadas de las clasificaciones supervisadas efectuadas para los años 2007, 2008, 2015, 2017 y 2019. Clases: Forraje (1), suelo desnudo (2), maíz (3), agua profunda (4), monte cerrado (5), pastizales (6), maní (7), suelos arado (8), eflorescencias salinas (9), arena (10), pastizales en dunas (11), monte abierto (12), agua superficial (13), soja (14), girasol (15), urbanizaciones (16).EO: error de omisión; EC: error de comisión; EP: exactitud del productor; EU: exactitud del usuario.

2019																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	EC	EU
1	338	0	4	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0,026	97,4
2	0	103	0	0	0	2	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0,055	94,5
3	3	0	42	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	4	0	0	0,176	82,4
4	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,026	97,4
5	0	0	0	0	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
6	1	0	0	0	0	54	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0,1	90
7	2	0	0	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,023	97,7
8	0	1	0	0	0	0	0	50	1	0	1	0	0	0	1	0	0,074	92,6
9	1	5	0	0	0	0	0	0	82	0	1	0	0	0	0	8	0,155	84,5
10	0	5	0	0	0	0	0	0	0	180	0	0	0	0	0	2	0,037	96,3
11	1	1	0	0	0	4	0	0	0	1	91	0	0	0	0	0	0,071	92,9
12	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0,047	95,3
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	100
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	121	0	0	0,024	97,6
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	100
16	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	26	0,071	92,9
EO	0,026	0,112	0,087	0	0	0,115	0,044	0	0,047	0,022	0,09	0	0,038	0,047	0,036	0,297		
EP	97,4	88,8	91,3	100	100	88,5	95,6	100	95,3	97,8	91	100	96,2	95,3	96,4	70,3		

2017																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	EC	EU
1	104	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,046	95,4
2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3	1	0	70	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0,054	94,6
4	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100



5	0	0	1	0	99	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,02	98
6	0	0	0	0	1	29	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,065	93,5
7	1	0	1	0	0	0	113	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0,042	95,8
8	0	0	2	0	0	0	0	85	2	0	0	0	0	0	0	0	0,045	95,5
9	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	2	0,071	92,9
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	203	1	0	0	0	0	2	0,019	98,1
11	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	45	0	0	2	0	1	0,135	86,5
12	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	3	178	0	0	0	0	0,043	95,7
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	100
14	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	144	1	0	0,034	96,6
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	100
16	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	18	0,143	85,7
EO	0,037	0,2	0,125	0	0,02	0,171	0,026	0	0,133	0	0,118	0,006	0	0,04	0,038	0,25		
PA	96,3	80	87,5	100	98	82,9	97,4	100	86,7	100	88,2	99,4	100	96	96,2	75		
2015																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	EC	EU
1	160	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,024	97,6
2	0	72	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0,077	92,3
3	1	0	160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,012	98,8
4	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0,182	81,8
5	0	0	0	0	104	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0,019	98,1
6	0	1	0	0	0	39	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0,071	92,9
7	2	0	0	0	0	0	583	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,005	99,5
8	0	0	0	0	0	0	0	66	0	3	0	0	0	0	0	0	0,043	95,7
9	0	0	0	0	0	0	0	0	39	1	0	0	1	0	0	0	0,049	95,1
10	0	2	1	0	0	0	0	0	0	151	1	0	1	0	0	2	0,044	95,6
11	0	7	0	0	0	3	0	0	0	2	88	0	0	0	0	0	0,12	88
12	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	1	82	0	0	0	0	0,047	95,3
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	100
14	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	231	0	0	0,013	98,7
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	70	0	0,014	98,6
16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0,026	97,4
EO	0,018	0,153	0,012	0	0,01	0,17	0,005	0	0	0,038	0,083	0,012	0,364	0,013	0	0,075		
PA	98,2	84,7	98,8	100	99	83	99,5	100	100	96,2	91,7	98,8	63,6	98,7	100	92,5		
2008																		



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	EC	EU
1	187	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,016	98,4
2	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3	0	0	119	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0,04	96
4	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
5	0	0	0	0	107	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0,027	97,3
6	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,023	97,7
7	1	0	1	0	0	0	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,022	97,8
8	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
9	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	1	0	0	0,022	97,8
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	134	0	0	0	0	0	2	0,015	98,5
11	1	0	0	0	0	4	0	0	0	1	76	3	0	0	0	0	0,106	89,4
12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	80	0	0	0	0	0,036	96,4
13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0,333	66,7
14	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	230	0	0	0,025	97,5
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0	100
16	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	24	0,04	96
EO	0,011	0	0,056	0,083	0,009	0,106	0,022	0	0,022	0,007	0,062	0,048	0	0,021	0,023	0,077		
PA	98,9	100	94,4	91,7	99,1	89,4	97,8	100	97,8	99,3	93,8	95,2	100	97,9	97,7	92,3		

2007

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	EC	EU
1	249	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0,008	99,2
2	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
3	2	0	304	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	8	0	0	0,035	96,5
4	0	0	0	53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
5	0	0	0	0	69	1	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0,068	93,2
6	0	0	0	0	0	69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
7	0	0	0	0	0	0	175	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
8	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
9	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	1	0,01	99
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	280	0	0	0	0	2	3	0,021	97,9
11	0	0	0	0	0	7	0	0	0	1	113	1	0	0	0	2	0,089	91,1
12	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	54	0	0	0	0	0,053	94,7
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	100



14	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	521	0	0	0,008	99,2
15	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	34	2	0,15	85	
16	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	92	0,052	94,8	
EO	0,016	0,043	0,013	0	0	0,127	0	0,333	0,02	0,011	0,017	0,085	0,017	0,021	0,056	0,08			
PA	98,4	95,7	98,7	100	100	87,3	100	66,7	98	98,9	98,3	91,5	98,3	97,9	94,4	92			

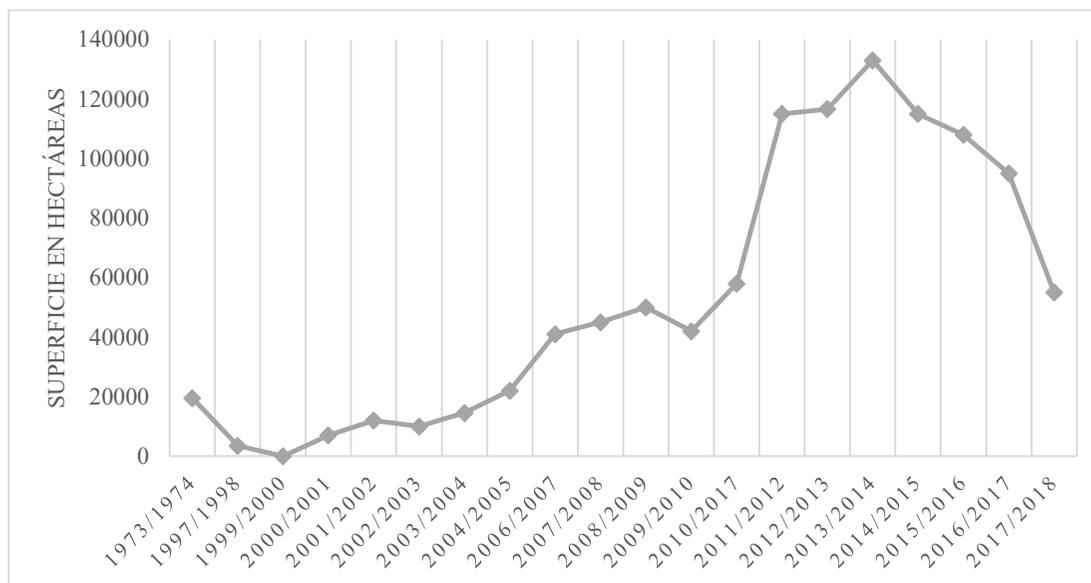


Figura 89. Variación temporal del área sembrada con cultivo de maní en el Dpto. General Roca. Datos de la Informe de Auditoría General de la Nación (2016).

Cálculos realizados para la adaptación del índice de estabilidad estructural de Pieri 1989 a la Pampa Medanosa empleando datos de muestras procesadas mediante el tamiz rotativo.

- Valor de CO al que no se puede disminuir la FE% (Valor CO umbral)

$$= 13,44 \text{ gr.kg}^{-1}$$

- EES% en el valor umbral de CO:

$$EES = \frac{97,8}{1 + 1,8^{(0,2*CO)}}$$

$$EES = \frac{97,8}{1 + 1,8^{(0,2*13,44\text{gr.kg}^{-1})}}$$

$$EES = 81,09579\%$$

- Valor de CO a EES 70 %:

$$EES = 70 = \frac{97,8}{1 + 1,8^{(0,2*CO)}}$$

$$70 * 1 + 1,8^{(0,2*CO)} = 97,8$$

$$\frac{70 * 1 + 1,8^{(0,2*CO)}}{70} = \frac{97,8}{70}$$

$$1,8^{(0,2*CO)} = \frac{97,8}{70} - 1$$

$$CO = \frac{\ln(\frac{97,8}{70} - 1)}{-0,2\ln(1,8)}$$

$$CO = 7,85539\text{gr. kg} - 1$$

- Valor de CO a EES 60 %:

$$EES = 60 = \frac{97,8}{1 + 1,8^{(0,2*CO)}}$$

$$60 * 1 + 1,8^{(0,2*CO)} = 97,8$$

$$\frac{60 * 1 + 1,8^{(0,2*CO)}}{60} = \frac{97,8}{60}$$

$$1,8^{(0,2*CO)} = \frac{97,8}{60} - 1$$

$$1,8^{(0,2*CO)} = 0,63$$

$$-0,2CO \ln(1,8) = \ln 1,63$$

$$CO = \frac{(\ln 1,63)}{(-0,2 \ln(1,8))}$$

$$CO = 3,93029 \text{ gr.kg}^{-1}$$

- Valor de CO a MO%:

$$MO \text{ a } 81,09\% \text{ EES} = \frac{13,44 \text{ gr.kg}^{-1}}{10} * 1,724 = 2,32 \text{ gr}/100 \text{ gr}$$

$$MO \text{ a } 70\% \text{ EES} = \frac{7,85539 \text{ gr.kg}^{-1}}{10} * 1,724 = 1,35 \text{ gr}/100 \text{ gr}$$

$$MO \text{ a } 60\% \text{ EES} = \frac{3,93029 \text{ gr.kg}^{-1}}{10} * 1,724 = 0,68 \text{ gr}/100 \text{ gr}$$

- Reemplazo de MO% en Pieri:

$$St = \frac{2,32}{30} * 100 = 7,733$$

$$St = \frac{1,35}{30} * 100 = 4,5$$

$$St = \frac{0,68}{30} * 100 = 2,27$$