



FACULTAD DE AGRONOMÍA  
Universidad Nacional de La Pampa

**CARACTERIZACIÓN DE LA MESETA DE LA SUBREGIÓN DE  
MESETAS Y VALLES DE LA PROVINCIA DE LA PAMPA PARA  
LA TOMA DE DECISIONES DE MANEJO POR AMBIENTE**

Trabajo final de graduación presentado para obtener el título de Ingeniero  
Agrónomo.

**AUTOR: Franco Schall Fredes**

**DIRECTORA: Dra. Elke Noellemeyer**

**CO-DIRECTOR: Ing. RRNN Emmanuel Leizica**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**UNLPam**

# Índice

1. **Introducción**4
- 1.1. **Hipótesis estadísticas**6
2. **Metodología**7
- 2.1. *Área de estudio*7
- 2.2. *Distribución de suelos en unidades y elementos geomorfológicos.*11
3. **Resultados**13
- 2.3. *Características de las cubetas y de la meseta*13
- 2.4. *Descripción de las características de los suelos de las cubetas y meseta.*15
- 2.5. *Mapa de unidades y elementos geomorfológicos asociados a taxonomía de suelos.*20
4. **Discusión**20
5. **Conclusión**24
6. **Bibliografía**25

## Resumen

La Pampa no posee un mapa de suelo con suficiente detalle para la implementación de sistemas productivos eficientes y con lineamientos más sustentables a los actuales. Disponer de un mapa de suelos, permite conocer las características y la distribución de estos, e implementar manejos acordes a su potencial. El objetivo del trabajo fue identificar y caracterizar diferentes unidades de suelo sobre un área de meseta de la subregión de mesetas y valles de la provincia de La Pampa. Su ejecución permitió comprender la dinámica suelo-relieve y desarrollar modelos conceptuales de esta relación. Esto es importante para la identificación de suelos de áreas más extensas con similares características geomorfológicas y su caracterización de acuerdo con su capacidad de uso. Además, la información obtenida a partir de la medición de las propiedades de los suelos constituyó un elemento clave para la toma de decisiones de uso y de manejo.

**Palabras claves:** Geomorfología, NDVI, cubetas de deflación, clasificación taxonómica de suelos, clasificación de uso.

## **Abstract**

There is no detailed soil map of La Pampa to help in the implementation of efficient productive systems with more sustainable standards than the present ones. A soil map facilitates the knowledge about their properties and distribution and enables the implementation of land management according to their potential. The objective of the present study was to identify and characterize different soil units in an area of the plains of the “*Mesetas and Valles*” subregion of La Pampa. Its execution allowed understanding the soil-relief dynamics and developing conceptual models of this relationship. This is important for the identification of soils of larger areas with similar geomorphological characteristics and their classification according to their capability class. Furthermore, the information obtained from the measurement of soil properties was a key element for decision-making regarding soil use and management.

**Key words:** Geomorphology; NDVI; Deflation pits; Soil Taxonomy; Soil Capability Class.

## 1. **Introducción**

El incremento en la demanda de alimentos y de sistemas productivos con lineamientos más sustentables requiere delimitar zonas de igual manejo en un marco de manejo sitio-específico (Stevens et al., 2014). La implementación de estrategias de manejo más sustentables en el suelo requiere conocer la heterogeneidad de las propiedades y su interacción con el ambiente. La variabilidad espacial de las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo genera limitaciones y oportunidades para la producción agrícola (Bossio et al., 2010). Por lo tanto, conocer la distribución espacial de los distintos tipos de suelos permite seleccionar el manejo más adecuado de acuerdo a su potencialidad y contribuye a la planificación del uso del suelo (de Paul Obade y Lal, 2013). En este sentido se entiende la planificación del uso del suelo como la evaluación sistemática del potencial de la tierra, de las alternativas para el uso del suelo y de las condiciones económicas y sociales, con el fin de seleccionar y adoptar las mejores opciones de uso del suelo (FAO, 2007).

La teledetección se ha convertido en una herramienta muy utilizada en la elaboración de mapas digitales de suelo dado a la facilidad de acceder a imágenes satelitales con diferentes resoluciones según las necesidades de trabajo (Mulder et al., 2011). Las imágenes satelitales poseen un enorme potencial en la planificación del uso de la tierra porque permiten articular la potencialidad de los suelos con las necesidades productivas sin degradar el recurso. Los modelos digitales de elevación (DEM en sus siglas en inglés) permiten obtener atributos del relieve, y los DEMs de 90 metros de resolución espacial, generados a partir de The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), son los más ampliamente utilizados.

En la Provincia de La Pampa, a pesar de que la actividad económica predominante es la agropecuaria, no se ha estudiado en forma sistemática la distribución de los suelos en el

paisaje. La provincia posee una carta de suelos a escala 1:500.000, publicada en 1980 para el Inventario de Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (INTA et al., 1980). Esta clasificación necesita ser actualizada porque desde entonces han ocurrido cambios en el uso de suelo y en la tecnología de labranza que pudieron haber afectado las propiedades diagnósticas de los suelos (Viglizzo y Jobbágy, 2010). Además, la escala de esta carta de suelos no permite distinguir suelos de similares aptitudes a nivel de potrero o establecimiento. En 2014 se realizó una actualización de esta a una escala 1:100.000, mediante la modelización e interpolación, aplicando la ecuación suelo-paisaje descripta por Dokuchaev (Vázquez, 2014). Sin embargo, no se realizó un muestreo de suelos que permita validar el nuevo mapa obtenido, y la escala sigue siendo poco detallada para identificar diferentes unidades de suelo a nivel de potrero.

Antecedentes de estudios llevados a cabo en la región pampeana indicarían que la heterogeneidad espacial de los suelos estaría ligada a su posición en el relieve, ya que este es un factor que tiene relación con la presencia de niveles freáticos someros, diferencias texturales por procesos erosivos, diferencias en el contenido de carbonato de calcio en el perfil de suelo (Gili et al., 2017; Urricariet et al., 2011), y la disponibilidad de agua y de nitrógeno (Gregoret et al., 2006). La presencia de un horizonte restrictivo a profundidad variable, como la costra calcárea de la subregión de mesetas y valles de la provincia de La Pampa (INTA et al., 1980), es otro factor importante en la clasificación porque limita el desarrollo de las raíces y la capacidad del suelo para retener agua útil. Esto a su vez impacta sobre la productividad y genera en los cultivos mayor dependencia de la distribución temporal de las precipitaciones (Bagnato et al., 2014; Quiroga et al., 2005). Sobre las mesetas se observan depresiones cerradas y alargadas con dirección OSO-ENE, denominadas cubetas de deflación, que no han sido identificadas porque no hay mapas geomorfológicos de detalle en la región. Además,

sobre las cubetas pueden describirse toposecuencias en las que se identifican diferentes elementos del relieve (loma, media loma y bajo) que aún no han sido analizados. Tampoco se caracterizaron los suelos que componen estas geoformas porque no existen estudios de suelo a escala de detalle. El relieve es considerado como uno de los factores formadores del suelo (Jenny, 1941) y por lo tanto hipotetizamos que los suelos situados en zonas de menor cota que su entorno presentan un mayor desarrollo. Para testear la hipótesis se planteó como objetivo identificar y caracterizar diferentes unidades de suelo de las cubetas y de la meseta sobre un área de meseta de la subregión de mesetas y valles de la provincia de La Pampa.

### **1.1. Hipótesis estadísticas**

H<sub>1a</sub>: Los carbonatos en la masa del suelo y el calcrete se presentan a mayor profundidad en el perfil de los bajos.

H<sub>10</sub>: La profundidad de los carbonatos y del calcrete en el perfil de suelo no presentan diferencias entre los elementos de la pendiente.

H<sub>2a</sub>: El espesor del horizonte superficial y el contenido de carbono orgánico son mayores en los suelos situados en el bajo.

H<sub>20</sub>: El espesor del horizonte superficial y su contenido de carbono orgánico es la misma para todos los elementos de la pendiente.

## 2. Metodología

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica al SE de la provincia de La Pampa, aproximadamente 120 km al S de la capital, Santa Rosa, y abarca una superficie de 9.500 ha sobre un sector de meseta de la subregión de mesetas y valles (Figura 1). Esta subregión, delimitada en el Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (INTA et al., 1980), se sitúa sobre el sector centro-este de la provincia y cubre una superficie aproximada de 24.404 km<sup>2</sup>. La meseta sobre la cual se ubicó el área de estudio está comprendida entre los valles Maracó Grande al norte y Hucal al sur. Los suelos de la meseta son de textura arenosa a franca, y corresponden a los órdenes taxonómicos Entisol y Molisol. También se caracterizan por la presencia de un horizonte petrocálcico (en este trabajo se utiliza el término calcrete como sinónimo) a una profundidad variable en el perfil del suelo, encontrándose en superficie en lugares donde la erosión es más intensa por incremento de gradiente de pendiente (Etcheverría y Folguera, 2014). El área de estudio pertenece a la unidad fitogeográfica del Espinal. El clima es semiárido, con una precipitación media anual de 664 mm para el periodo 1984-2016.

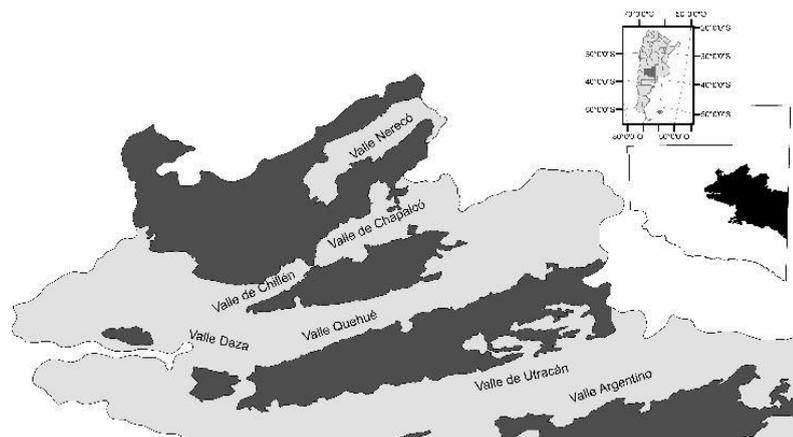


Figura 1: Ubicación del área de estudio (en línea punteada) en la subregión de mesetas y valles en la Provincia de La Pampa.

La meseta representa una unidad geomorfológica de bajo gradiente en la que se encuentran incluidas subunidades geomorfológicas denominadas cubeta de deflación. Estas representan unidades de menor superficie y de mayor gradiente que las mesetas. Los muestreos fueron realizados en forma dirigida sobre la meseta y en dos cubetas previamente seleccionadas. En cada cubeta se discriminó tres elementos de la pendiente como loma, media loma y bajo con la finalidad de dividir a la pendiente en unidades más pequeñas. La disección de la pendiente se realizó mediante observación del relieve a campo. Se consideró loma aquellas superficies planas, estables y que constituyen sectores de mayor cota de la cubeta. Por el contrario, el bajo se consideró a las zonas de menor cota donde las líneas de flujo tendieron a converger. Finalmente la media loma consistió en un área recta e intermedia entre las otras dos y donde el gradiente de pendiente era suficiente para generar un flujo de agua y materiales a través de la pendiente (Schaeztl, 2013). Dado a que en el área la ganadería predomina sobre la agricultura, y a fin de que los resultados sean representativos, se seleccionaron sectores de las cubetas con cobertura de pastizal natural o pasturas perennes. Luego de identificar los elementos de la pendiente, se procedió a muestrear la loma, la media loma, el bajo y la unidad meseta (Figura 2).

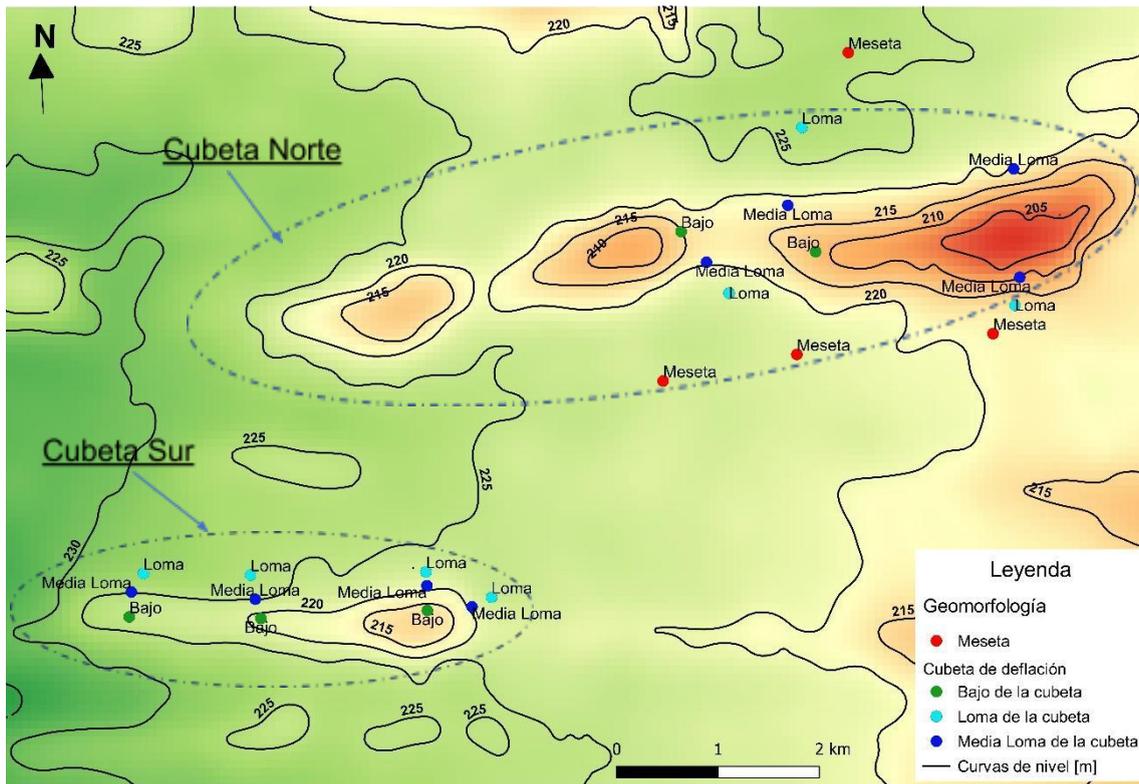


Figura 2: Distribución de las calicatas sobre el área de estudio. Con círculos de color amarillo, naranja, rojo y verde se señala las calicatas sobre la meseta, loma, media loma y bajo respectivamente.

Para la cubeta “Sur”, se obtuvieron datos de 11 muestreos en total, de las cuales cuatro se realizaron en la loma y en la ladera y tres en el bajo. Sobre la cubeta “Norte” se realizó un total de 9 muestreos, de los cuales 4 fueron sobre loma, 3 en la ladera y 2 sobre el bajo, y en la meseta se realizaron 4 calicatas.

La profundidad máxima de las calicatas fue de 1,5 m o hasta alcanzar el horizonte petrocálcico y para clasificar los suelos se utilizó la clasificación Soil Taxonomy (Soil Survey Staff., 2014). Por cada calicata se realizó la descripción del perfil del suelo de acuerdo a las normas establecidas (USDA Soil Survey, 2009), se identificaron los horizontes y su espesor, se caracterizaron morfológicamente y se extrajo aproximadamente 2 kg de suelo para el análisis en laboratorio de textura, color, pH, humedad equivalente, capacidad de intercambio catiónico y cationes de intercambio, de acuerdo a las metodologías estándar. Luego de que las muestras fueran secadas al aire y

tamizadas por un tamiz de 2 mm se utilizó el método de la pipeta de Robinson para determinar la textura (Gee y Bauder, 1986). Se determinó la textura de todos los horizontes de cada perfil para obtener una medida de cambios en esta propiedad, y se consideró el horizonte más profundo como referencia de las características del material parental. El color se determinó en seco mediante la tabla de colores de suelo Munsell. Se determinó pH actual (suelo: agua 1:2,5), capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables por extracción con acetato de amonio a pH 7 y acetato de sodio a pH 8.2 y determinación de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  por titulación con EDTA, y de  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  por fotometría de llama (Hendershot y Lalonde, 2006). La densidad aparente se determinó mediante el muestreo de un volumen conocido de suelo en un anillo de acero y determinación de su masa. El contenido de humedad a capacidad de campo se determinó a través de la humedad equivalente, método que consiste en saturar el suelo con agua en cestillas por 24 h, centrifugar a 1500 rpm, determinación de peso en húmedo y secado en estufa hasta peso constante para luego determinar el peso del suelo seco. Obtenidos los valores de peso húmedo y seco, por diferencia se calculó la humedad equivalente en porcentaje. Luego se calculó capacidad de retención de agua del perfil del suelo (CRA) (Fernandez et al., 2016), utilizando los valores de las constante hídricas del horizonte A. La determinación analítica de carbonatos sobre el primer horizonte del perfil se realizó mediante el uso de un calcímetro, lo cual permitió definir los horizontes cálcicos y por consiguiente los órdenes de suelos en la clasificación de la Soil Taxonomy.

El análisis de materia orgánica se realizó en muestras del horizonte A, cuyo espesor fue definido en la observación de la calicata. La técnica utilizada para la determinación de materia orgánica fue a través de la digestión con dicromato de potasio y ácido sulfúrico y cuantificación colorimétrica. A través de este método se obtuvo el valor de contenido

de carbono orgánico y fue multiplicado por 1,72 para obtener el porcentaje de materia orgánica (Skjemstad y Baldock, 2006). Finalmente se calculó el índice IMO para evaluar la degradación del suelo. Éste índice es una relación entre el contenido de materia orgánica y la proporción de partículas finas del suelo ( $MO^*(\text{arcilla} + \text{limo})^{-1} * 100$ ). Comparativamente suelos con valores de IMO más altos indicarían suelos en mejor estado conservación (Quiroga et al., 2006).

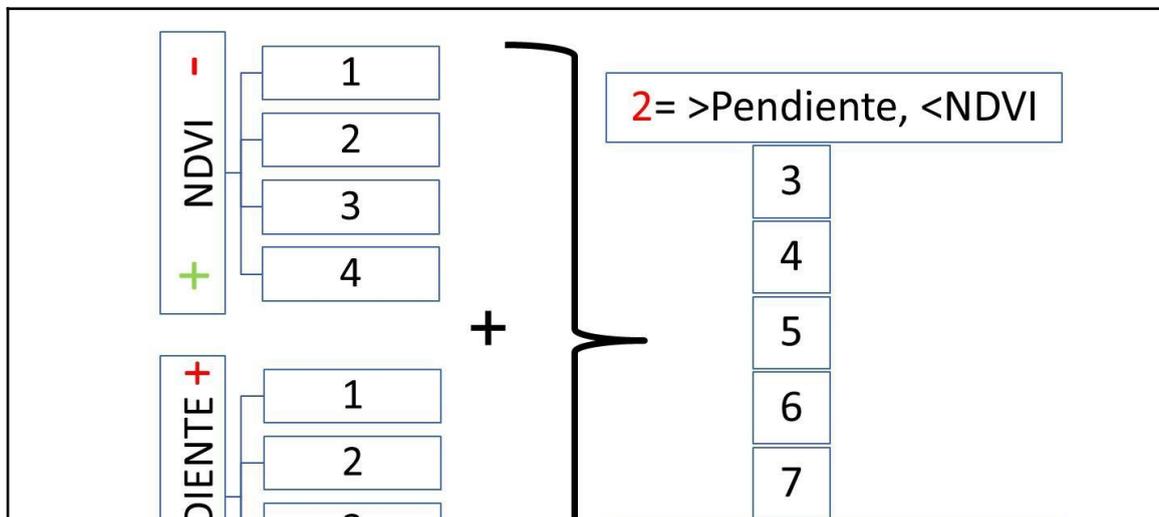
El análisis de las variables de suelo se realizó mediante ANOVA con comparación de medias por test de Tukey ( $p < 0.05$ ) mediante el software Infostat. También se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con las variables para observar agrupamientos entre las distintas posiciones de las cubetas y la meseta. Este análisis se realizó con el software Canoco 5.04. Además, las variables de suelo medidas a campo y en el laboratorio fueron utilizadas para la clasificación de los suelos según Soil Taxonomy.

## *2.2. Distribución de suelos en unidades y elementos geomorfológicos.*

Se elaboró un mapa geomorfológico 1:50.000 en el que se identificaron unidades y elementos geomorfológicos. Para la elaboración del mapa se utilizó la pendiente obtenida del MDE SRTM 90 metros y el Índice Verde Normalizado (NDVI) calculado a partir de imagen Landsat 5 del mes de diciembre de 2010 y previamente corregida a tope de atmosfera mediante el plugin Semi-Automatic Classification del Software QGis. La pendiente fue reclasificada y se le asignó valores categóricos del 1 al 4 a pendientes  $\leq 2\%$ ;  $>2\%$  y  $\leq 3\%$ ;  $>3\%$  y  $\leq 4\%$ ;  $>4\%$  respectivamente, para lo cual se utilizó el software QGis. El índice NDVI también fue re-clasificado y se le asignó valores de 4 a 1 a los números digitales  $\leq 0,28$ ;  $>0,28$  y  $\leq 0,36$ ;  $>0,36$  y  $\leq 0,40$ ;  $>0,40$  respectivamente. La fecha seleccionada para la imagen satelital fue diciembre de 2010 porque la

precipitación media anual de ese año en la región fue menor a la media anual histórica. Durante los periodos de sequías la vegetación expresa, a través de su vigorosidad, la heterogeneidad espacial de las propiedades de los suelos. Es por este motivo que se utilizó el índice NDVI a partir de una imagen satelital obtenida durante un periodo seco para encontrar diferencia espacial en la distribución de los suelos.

Ambas capas de información fueron sumadas con el software Dinámica EGO versión 4.0. y como resultado se obtuvo un raster con valores mínimo de 2 y máximo de 8 (Figura 3). Valores de pixel menores se corresponde a sitios con gradientes relativamente bajos (gradiente  $\leq 2\%$ ) y altos valor de NDVI ( $\text{NDVI} \geq 0.40$ ), en el extremo opuesto se obtuvieron valores de píxel altos. El raster fue nuevamente reclasificado para lo cual se agruparon los valores bajos (valores de pixel 2, 3 y 4), medios (valor de pixel 5) y altos (valores de pixel 6, 7 y 8) para obtener 3 clases. Finalmente se crearon polígonos agrupando los valores de la misma clase y los clústeres generados fueron asociados a las unidades y elementos geomorfológicos observados a campo. Por último a cada unidad y elemento se le asignó una clasificación de suelo, según las variables analizada en cada calicata, y una clasificación de uso de suelo según la clasificación utilitaria USDA (USDA, 1961).



**Figura 3:** Esquema de la obtención de índice a partir de valores de NDVI y pendiente.

### 3. Resultados

#### 2.3. Características de las cubetas y de la meseta

La meseta se caracterizó por presentar un relieve suave, con un gradiente  $\leq 2\%$ . Los suelos de esta unidad fueron moderadamente bien drenados. El bajo gradiente y la presencia de calcrete a escasa profundidad ( $76.2 \text{ cm} \pm 30$ ) no permite el drenaje rápido del agua del suelo luego de una precipitación, pero es fácilmente removida por evapotranspiración. El agua libre a escasa profundidad, observada en la calicata luego de una precipitación, se acumula por un corto tiempo sobre el calcrete y forma una zona de suelo saturada. La vegetación de la meseta estuvo representada por un estrato gramíneo-herbáceo. Las subunidades cubetas de deflación estuvieron representadas por depresiones con orientación OSO-ENE y un gradiente  $\geq 3\%$  en la posición media loma de la pendiente. El tamaño de las cubetas sobre las que se realizó el muestreo fueron diferentes. En la cubeta “Sur” (Figura 2) posee una superficie aproximada de 369 has, mientras que la superficie de la cubeta “Norte” fue de aproximadamente 1.327 has. Las cubetas poseen un patrón de drenaje centrípeto en el cual las líneas de flujo convergen en el bajo. La geomorfología y la vegetación de la posición loma fue similar al de la unidad meseta. Sobre la posición media loma la erosión hídrica se evidenció por la observación en superficie de arrastre de materiales orgánicos e incluso la formación de pequeños canales. Los suelos situados sobre la media loma fueron algo excesivamente drenados, porque el agua gravitacional del suelo escurre rápidamente debido al elevado gradiente. Los suelos de los bajos reciben aporte lateral de agua proveniente de las zonas de mayor cota. Sin embargo, son suelos bien drenados porque el calcrete en el perfil no se lo observó hasta una profundidad de 1,5 m, y tampoco el nivel freático. Por

lo tanto, no se observaron rasgos redoximórficos en el perfil. En cuanto a la vvegetación de la media loma y el bajo estuvo representada por un estrato gramíneo/herbáceo (Figura 4) y la presencia de pequeños relictos de vegetación leñosa de más de 3 metros de altura, representada por Caldén (*Prosopis caldenia*) (Figura 5).



**Figura 4:** Vista del estrato gramíneo/herbáceo de la media loma de la cubeta Sur.



**Figura 5:** Vista de relikto de caldén sobre el bajo de la cubeta Norte.

#### *2.4. Descripción de las características de los suelos de las cubetas y meseta.*

Los suelos situados en la misma posición del relieve de ambas cubetas de deflación fueron analizados en forma conjunta. Se decidió apartar del análisis estadístico aquellos perfiles de suelos que presentaron características distintas al de los perfiles modales

(Tabla 1). Se entiende por perfil modal aquel que refleja más frecuentemente las características de los suelos de un área definida.

Tabla 1: Perfiles modales de loma, media loma, bajo y meseta

Sitio	Horizonte	Prof. cm	Espesor cm	Arcilla (g kg <sup>-1</sup> )	Limo (g kg <sup>-1</sup> )	Arena (g kg <sup>-1</sup> )	Textura	MO (g kg <sup>-1</sup> )	Color
<b>Meseta</b>	A	0-16	16	183	361	456	Franco	28	10YR4/ 3
	AC	16-24	8	178	395	426	Franco	-	10YR4/ 3
	C <sub>1</sub>	24-42.5	18,5	193	386	421	Franco	-	10YR4/ 3
	C <sub>2</sub>	42,5-82	39,5	123	381	496	Franco	-	10YR5/ 3
	C <sub>k</sub>	82-108	26	116	323	561	Franco arenoso	-	10YR5/ 3
	C <sub>km</sub>	>108	-	-	-	-	-	-	-
<b>Loma</b>	A	0-17	17	149	251	600	Franco arenoso	27,7	10YR4/ 2
	AC	17-27	10	159	305	536	Franco arenoso	-	10YR4/ 2
	C	27-33	6	145	285	570	Franco arenoso	-	10YR4/ 3
	C <sub>k</sub>	33-70	37	107	331	562	Franco arenoso	-	10YR5/ 2
	C <sub>km</sub>	>70	-	-	-	-	-	-	-
<b>Media loma</b>	A <sub>k</sub>	0-13	13	111	268	620	Franco arenoso	34,1	10YR4/ 2
	AC <sub>k</sub>	13-22	9	130	253	617	Franco arenoso	-	10YR4/ 2

	C <sub>k</sub>	22-42	20	117	293	590	Franco arenoso	-	10YR5/ 2
	C <sub>km</sub>	>42	-	-	-	-	-	-	-
<b>Bajo</b>	A	0-17	17	179	342	479	Franco	32	10YR4/ 2
	AC	17-32	15	153	437	410	Franco	-	10YR4/ 3
	C <sub>1</sub>	32-72	40	192	405	403	Franco	-	10YR4/ 3
	C <sub>2</sub>	72-97	25	156	470	369	Franco	-	10YR5/ 3
	C <sub>k1</sub>	97-140	43	225	413	362	Franco	-	10YR5/ 3
	C <sub>k2</sub>	>140	-	193	384	423	Franco	-	10YR5/ 3

Se descartaron en total 6 perfiles de suelo, 2 en la loma, 3 en la media loma y 1 en el bajo, lo cual redujo la variabilidad de los datos. Los muestreos que fueron realizados bajo vegetación arbórea presentaron perfiles muy diferentes al modal. En la Figura 6 puede apreciarse la ubicación de un muestreo realizado en media loma y otro en el bajo, ambos con cobertura arbórea. El perfil de suelo de la calicata sobre media loma fue mucho más profundo, con mayor contenido de materia orgánica, pH más ácido y presencia de carbonatos en la masa a mayor profundidad que en el perfil modal. En cuanto al perfil del suelo del bajo, se observó una textura más gruesa que las demás calicatas de la misma posición. Los demás perfiles sobre la loma y media loma, que también fueron apartados del análisis, presentaron un perfil muy somero comparado con el perfil modal.

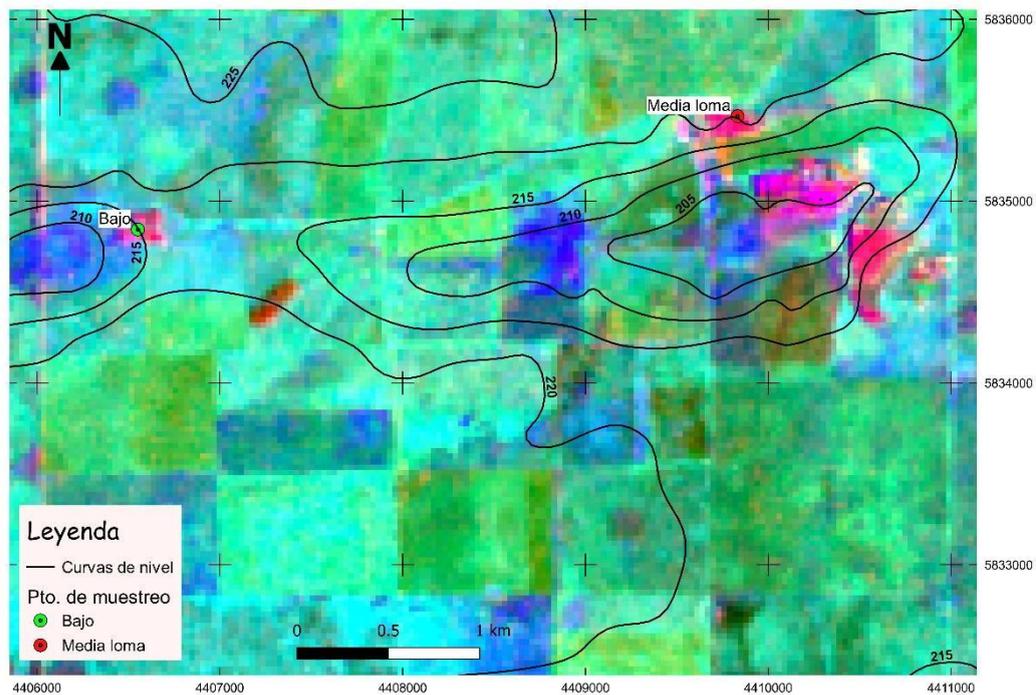


Figura 6: La imagen es una composición RGB obtenida de la combinación de una imagen radar FBD ALOS PALSAR (agosto de 2010) y una imagen Landsat 5 TM (noviembre de 2010) del área de estudio, donde se observan las ubicaciones de los dos perfiles con vegetación de bosque de caldén. En color magenta en la imagen se representa la distribución de vegetación arbórea en el área de estudio.

De los perfiles analizados (Tabla 2) se obtuvo que la fracción mineral más fina (limo + arcilla) fue mayor en el bajo y meseta con respecto a la media loma (F: 5.12; p: 0.0123). La profundidad de los carbonatos, espesor del horizonte superficial y el valor pH mostraron diferencias significativas entre media loma y bajo. El bajo presentó carbonatos a mayor profundidad en el perfil (F: 8.47; p: 0.0016), mayor espesor del primer horizonte (F: 7.5; p: 0.0027) y valores de pH menores (F: 5.2; p: 0.116). En todos los casos el horizonte superficial fue un “horizonte A” y clasificó como un epipedón mólico según la clasificación Soil Taxonomy.

El contenido de materia orgánica mostró diferencias significativas entre la meseta y el bajo (F: 2.04; p: 0.15). El valor promedio de materia orgánica en la meseta fue de 25 g kg<sup>-1</sup>, mientras que en el bajo el valor fue 32 g kg<sup>-1</sup>. El índice MO fue significativamente

mayor en la media loma que el resto de los ambientes analizados (F: 7.41; p: 0.0029). En todos los perfiles de los bajos fueron más profundos y desarrollados que el resto de los ambientes. En el bajo la CRA fue significativamente mayor que en los demás elementos del relieve y la meseta (F: 11.14; p: 0,0004).

Tabla 2: Propiedades fisicoquímicas de los perfiles de suelo.

	Meseta	Loma	Media loma	Bajo
<b>Profundidad del calcrete (cm)</b>	76.2 ± 30	55.1 ± 15.6	42 ± 14.4	≥150
<b>Limo+Arcilla (g kg<sup>-1</sup>)</b>	497.9 ± 81.7 b	461.2 ± 89.2 ab	353.4 ± 47.1 a	530 ± 68.0 b
<b>Profundidad CaCO<sub>3</sub> (cm)</b>	40.25 ± 40.32 a	21.33 ± 15.59 a	8.9 ± 9.54 a	79.25 ± 17.33 b
<b>pH</b>	7.53 ± 0.55 ab	7.32 ± 0.52 ab	8 ± 0.46 b	6.8 ± 0.18 a
<b>Prof. Horizonte Superficial (cm)</b>	16.5 ± 3.7 bc	12.83 ± 2.48 ab	10.7 ± 1.79 a	20 ± 4.69 c
<b>MO (g kg<sup>-1</sup>)</b>	25.03 ± 2.46 a	29.58 ± 4.24 ab	28.86 ± 5.92 ab	32.36 ± 3.55 b
<b>IMO</b>	5.28 ± 0.55 a	6.51 ± 0.89 a	8.28 ± 1.25 b	6.25 ± 0.34 a
<b>CRA (mm)</b>	136.3 ± 58.8 a	108.1 ± 30.8 a	69.0 ± 31.2 a	262.3 ± 85.2 b

Letras distintas señalan diferencias significativas entre posiciones topográficas ( $\alpha \leq 0.5$ ).

El análisis de componentes principales (ACP, Figura 7) indicó que el pH, profundidad de carbonatos, contenido de partículas minerales de tamaño limo y arcilla, profundidad del horizonte superficial y capacidad de retención de agua útil y cantidad de carbonatos, fueron las variables que permitieron separar los perfiles de suelo del bajo y la ladera. Pero estas mismas variables no permitieron separar los perfiles de la loma y de la meseta. Los componentes principales 1 y 2 explicaron el 75.4% de la función discriminante generada y el mayor porcentaje de la variabilidad acumulada fue explicada por el primer componente (58.8%). Los suelos de la media loma se caracterizaron por presentar un horizonte superficial somero con presencia de carbonatos en la masa, valores altos de cationes de calcio en el complejo de intercambio, pH alcalino y una textura más gruesa que el resto de los sitios. El suelo del

bajo presentó un perfil completamente diferente al de la media loma, con perfiles más profundos, lo cual permitió obtener valores más altos de capacidad de retención de agua útil. Los perfiles de los suelos de la loma y meseta no pudieron ser separadas del resto de los sitios y presentaron valores intermedios en las variables analizadas.

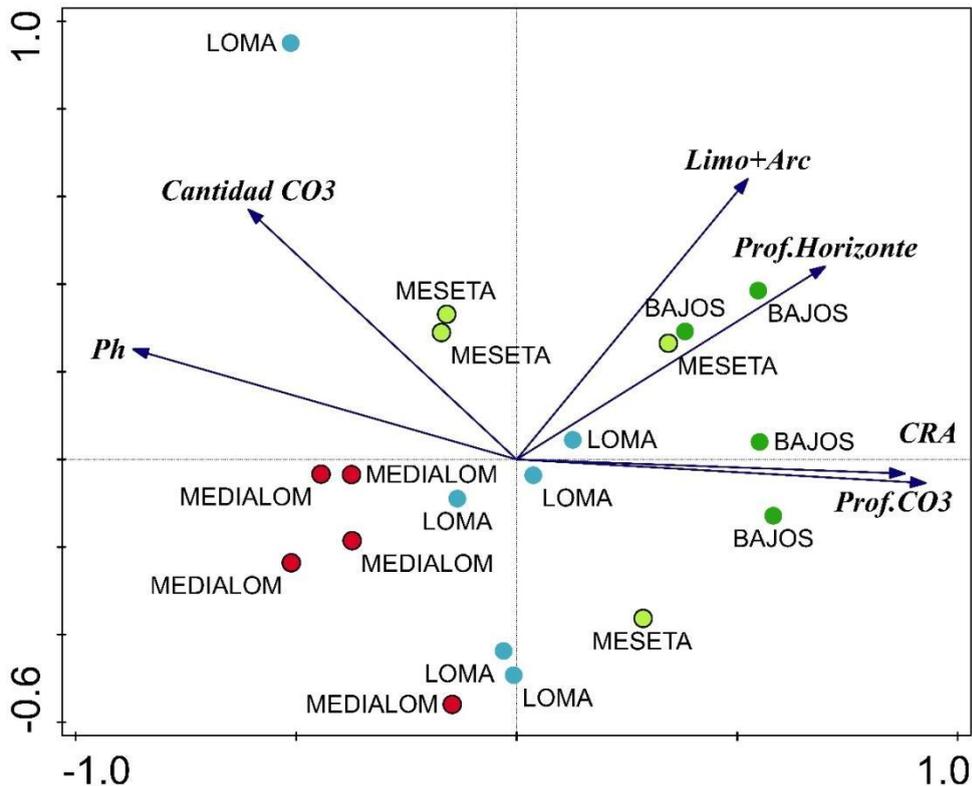


Figura 7. Análisis de componentes principales (ACP) para loma, media loma, bajo y la meseta, considerando, pH, profundidad de los carbonatos (Prof. CO<sub>3</sub>), cantidad de carbonatos (Cantidad CO<sub>3</sub>), contenido de partículas minerales de tamaño limo y arcilla (Limo+Arc.), profundidad del horizonte superficial (Prof. Horizonte) y capacidad de retención de agua útil (CRA).

De acuerdo con las propiedades fisicoquímicas de los suelos y el sistema de clasificación Soil Taxonomy, la meseta y la loma poseen una consociación de suelos con predominancia del Paleustol petrocálcico sobre Calciustol petrocálcico. Por el contrario, el suelo de la ladera fue clasificado como una consociación de suelos con

predominancia del Calciustol petrocálcico sobre el Paleustol petrocálcico. Por último, el suelo de los bajos fue clasificado como Haplustol típico.

### 2.5. Mapa de unidades y elementos geomorfológicos asociados a taxonomía de suelos.

Del análisis del índice NDVI y del gradiente de pendiente, se identificaron tres superficies distintas que coinciden con la unidad geomorfológica meseta y los elementos geomorfológicos ladera y bajo de la subunidad cubeta. Mientras que la loma no fue identificada, quedando ésta incluida en la unidad meseta. También se identificaron pequeñas superficies de 0.5 hectáreas aproximadamente con forma circular. Frank Buss et al. (2019) identificaron a estas subunidades como cubetas de deflación en un trabajo realizado a pocos kilómetros del área de estudio. Según la descripción de suelos realizada por estos autores, estas cubetas poseen un suelo Haplustol típico. De las 9.500 has del área de estudio, el 13 % correspondió a ladera (1.251 has), el 82 % a meseta y el 5 % del área total de estudio (505 has) correspondió a bajo (Figura 8).

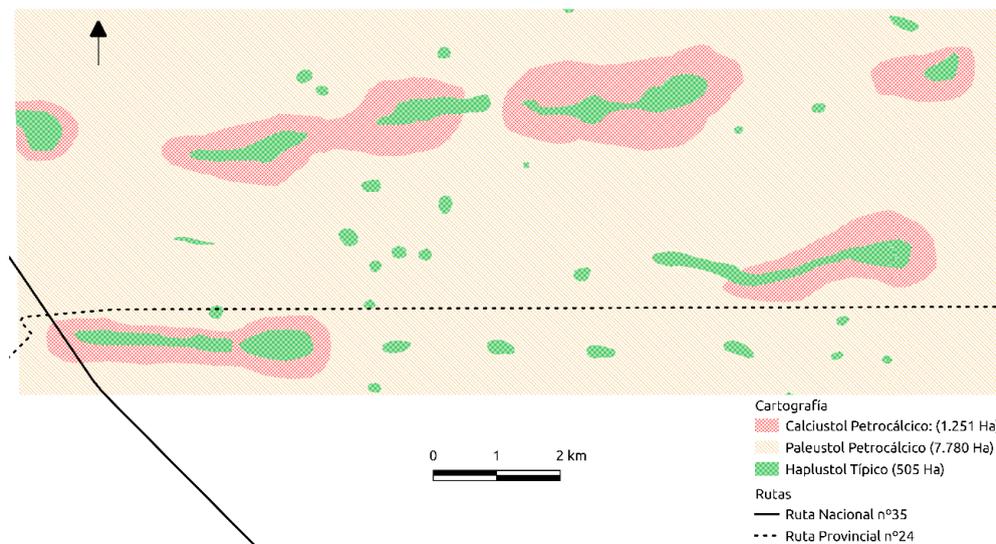


Figura 8. Mapa de los suelos asociados a las unidades geomorfológicas del área de estudio.

#### **4. Discusión**

Las características de suelos en las cubetas variaron de acuerdo con su posición en el paisaje. Las diferencias encontradas en las características fisicoquímicas de los suelos en la toposecuencia loma, media loma y bajo, indicaron que la intensidad con la que actuaron los procesos formadores y erosivos fueron diferentes. Pero estas mismas propiedades no mostraron diferencias entre los suelos de la loma y meseta. Si bien, el relieve es uno de los factores formadores de mayor peso que definen las propiedades de suelo, en este caso el gradiente en ambos ambientes fue menor al 2%, por lo que se permite suponer que los procesos formadores actuaron con la misma intensidad en ambas posiciones topográficas.

Los suelos más desarrollados se encontraron en la posición bajo y fueron clasificados como Haplustol típico, con una representación del 5% del área total (505 ha). En los demás ambientes los perfiles estuvieron limitados por el calcrete en los primeros 150 cm de suelo. La mayoría de los suelos de la media loma se caracterizaron por presentar horizontes cálcicos en los primeros 18 cm, por lo que fueron clasificados como una consociación de suelos con predominancia del Calciustol petrocálcico sobre el Paleustol petrocálcico. Estos tipos de suelos se hallaron en una superficie de 1.251 ha (13 % del área total). Por último, los suelos en la loma y meseta mostraron características intermedias, y fueron clasificados como una consociación de suelos con predominancia del Paleustol petrocálcico sobre el Calciustol petrocálcico y cubrieron 7.780 has, las cuales representan el 82 % del área total.

La presencia de calcrete cerca de la superficie en la media loma fue la principal limitante de la capacidad de estos suelos para retener agua útil y para el desarrollo radicular de la vegetación. Es por este motivo que el análisis del NDVI demostró que la

media loma es el ambiente con menor capacidad de mantener la vegetación saludable durante un periodo de sequía, como el que transcurrió durante el año 2009.

En general, el incipiente desarrollo de los perfiles de los suelos de la ladera y su textura más gruesa (franca arenosa) que los demás ambientes, genera una baja capacidad de retención de agua útil. De esta manera se incrementa la cantidad de agua de las precipitaciones que escurre superficialmente y arrastra partículas orgánicas y minerales hacia el bajo, lo cual crea un ciclo vicioso de degradación. La pérdida de partículas minerales incrementa aún más el escurrimiento superficial y la disminución de materia orgánica reduce aún más la agregación de las partículas. Por lo tanto, se puede suponer que los suelos de las laderas han superado un umbral de equilibrio y, de acuerdo al modelo conceptual de estados y transiciones (Phillips y Van Dyke, 2017), actualmente se encuentran en un estado estable más degradado, y por lo tanto menos productivo, comparado a su estado antes del cambio del uso del suelo. La calicata sobre la media loma con vegetación arbórea constituye un perfil de referencia y a partir del cual se refleja la divergencia de suelos en una misma posición, pero con manejos contrastantes. Estas condiciones de suelo poseen poca representatividad espacial en el área de estudio porque las superficies con vegetación arbórea son escasas.

Los valores más elevados de materia orgánica se encontraron en el bajo lo cual, se debe a que la actividad biológica en el bajo es más intensa porque dispone de mayores contenidos hídricos a causa de su posición en el relieve. A pesar de esta diferencia, los valores de materia orgánica en todos los ambientes fueron altos. Esto puede relacionarse con el secuestro de carbono por parte del pastizal y el anclaje del suelo mediante sus raíces que ejerce un efecto protector, especialmente para los suelos ubicados sobre la ladera. La alta densidad de raíces, que se concentran en un estrecho espesor del suelo también puede haber causado el elevado valor de MO en estos perfiles. Las diferencias

en el espesor del primer horizonte y el pobre desarrollo en el perfil de los suelos en las laderas evidenciaron que estos fueron severamente erosionados. Esto mismo se reflejó en los demás perfiles de la media loma y loma que no fueron considerados en el análisis. Sin embargo, los valores obtenidos de materia orgánica fueron cercanos a los esperados en ambientes con vegetación nativa de esta región (Frank Buss et al., 2019; Gili et al., 2010). Esto indicaría la resiliencia de los suelos que recuperan valores “normales” de materia orgánica cuando se estabilizan y cuando el balance de materia orgánica es positivo bajo cobertura de pasturas y pastizales naturales (Berhongaray et al., 2013).

La combinación del mapa de pendientes, junto con uno de NDVI (correspondiente a un año normal-seco para que el índice se exprese mejor) brindó la posibilidad de zonificar el área por dos criterios importantes como son: el riesgo de erosión (por excesivas pendientes) y NDVI o índice de verdor, relacionado en este caso con la profundidad del perfil y la capacidad de los suelos de retener y proveer agua durante los períodos de sequía (Ghulam et al., 2008). El resultado de este análisis permitió identificar las diferentes unidades o elementos geomorfológicos geográficamente, y se pudo calcular la superficie de cada uno. Según la clasificación de capacidad de uso del USDA, ningún suelo presenta buenas cualidades agrícolas, debido a las características del clima por un lado y de los suelos y la topografía por otro lado. En este sentido, los suelos de la pendiente presentaron severas limitaciones, por su perfil con escaso desarrollo y su gradiente ( $>2\%$ ) que indicaron que podrían clasificarse como Clase 6se, no apto para agricultura y con alta riesgo de erosión. Si bien hoy en día este ambiente cuenta con una cobertura estable y un buen nivel de MO provisto por los residuos de pasturas naturales perennes, fue muy erosionado en el pasado por el viento y el agua, a causa de su uso agrícola. Los suelos de la meseta se consideraron como Clase 5s, no apto para

agricultura, debido a su escasa profundidad (en promedio 76 cm) y baja CRA (130 mm). Los suelos de los bajos se clasificaron como Clase 4c, debido a las restricciones climáticas, y resultaron ser los mejores suelos encontrados que podrían constituir unidades de manejo estratégico para el productor. Debido a su alta CRA los suelos de los bajos son capaces de incorporar en su perfil los aportes de agua de las posiciones más altas del relieve y esto permite un manejo con períodos adecuados de barbecho (Fernandez et al., 2008). Lo cual permite asegurar una provisión más estable de agua para los cultivos con mayores niveles productivos. En un primer análisis, podría pensarse que la superficie con suelos aptos para realizar agricultura es muy escasa, reducida al 5% del área en cuestión. Desde el punto de vista de la agricultura de precisión, esa superficie significa la posibilidad de realizar un manejo diferencial para la producción de cultivos de mayor valor con la posibilidad de agregar mayor estabilidad de ingresos a los establecimientos agropecuarios de la región.

## **5. Conclusión**

Se logró encontrar una relación entre las propiedades de los suelos, su posición en el relieve y la vegetación, lo cual indica que la metodología propuesta es la adecuada para diferenciar y mapear ambientes en la región semiárida. Las características físico-químicas de los suelos permitieron diferenciar la unidad meseta de la media loma y bajo, de la subunidad cubeta, pero no la loma. Por este motivo es que la loma quedó incluida en la meseta en el mapa de unidades geomorfológicas.

Los suelos de bajos poseen la mayor capacidad productiva pero la posibilidad de realizar un uso diferenciado es limitada por su escasa representatividad. En cambio, la superficie de la meseta/loma es la más amplia y las posibilidades de uso estará condicionada a los ciclos secos y húmedos. Por último, zona de media loma es la más

susceptible a la erosión y la que requiere especial atención porque representó una extensión importante del área de estudio. Si bien hoy en día este ambiente cuenta con una cobertura estable y un buen nivel de MO provisto por la presencia de pasturas naturales perennes, fue muy erosionado en el pasado por el viento y el agua, a causa de labores excesivas. Esta zona no debería incorporarse a la actividad agrícola, manteniendo el pastizal natural sin ejercer demasiada presión de pastoreo.

## **6. Bibliografía**

- Bagnato, R., Álvarez, C., Noellemeyer, E., Gili, A., Becker, A., Quiroga, A., 2014. Efecto del ambiente sobre la productividad del cultivo de maíz en la region semiarida pampeana, in: XXIV Congreso Argentino de La Ciencia Del Suelo II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas.”
- Berhongaray, G., Alvarez, R., De Paepe, J., Caride, C., Cantet, R., 2013. Land use effects on soil carbon in the Argentine Pampas. *Geoderma* 192, 97–110. doi:10.1016/j.geoderma.2012.07.016
- Bossio, D., Geheb, K., Critchley, W., 2010. Managing water by managing land: Addressing land degradation to improve water productivity and rural livelihoods. *Agric. Water Manag.* 97, 536–542. doi:10.1016/j.agwat.2008.12.001
- de Paul Obade, V., Lal, R., 2013. Assessing land cover and soil quality by remote sensing and geographical information systems (GIS). *CATENA* 104, 77–92. doi:10.1016/j.catena.2012.10.014
- Etcheverría, M.P., Folguera, A., 2014. Los calcretes del sudeste de la provincia de La Pampa: caracterización y origen. *Rev. la Asoc. Geológica Argentina* 71, 92–99.
- FAO, 2007. Land evaluation. Towards a revised framework, Land and Water Discussion Paper 6. FAO 2007, Roma, Italia.
- Fernandez, R., Quiroga, A., Cristian, A., Carlos, L., Noellemeyer, E., 2016. Valores

umbrales de algunos indicadores de calidad de suelos en molisoles de la Región Semiarida Pampeana. *Cienc. del Suelo* 34.

Fernandez, R., Quiroga, A., Noellemeyer, E., Funaro, D., Montoya, J., Hitzmann, B., Peinemann, N., 2008. A study of the effect of the interaction between site-specific conditions, residue cover and weed control on water storage during fallow. *Agric. Water Manag.* 95, 1028–1040. doi:10.1016/j.agwat.2008.03.010

Frank Buss, M.E., Leizica, E., Peinetti, R., Noellemeyer, E., 2019. Relationships between landscape features, soil properties, and vegetation determine ecological sites in a semiarid savanna of central Argentina. *J. Arid Environ.* 104038. doi:10.1016/j.jaridenv.2019.104038

Gee, G.W., Bauder, J.W., 1986. Particle-size Analysis, in: *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, pp. 383–411. doi:10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15

Ghulam, A., Li, Z.-L., Qin, Q., Yimit, H., Wang, J., 2008. Estimating crop water stress with ETM+ NIR and SWIR data. *Agric. For. Meteorol.* 148, 1679–1695. doi:10.1016/j.agrformet.2008.05.020

Gili, A., Álvarez, C., Bagnato, R., Noellemeyer, E., 2017. Comparison of three methods for delineating management zones for site-specific crop management. *Comput. Electron. Agric.* 139, 213–223. doi:10.1016/j.compag.2017.05.022

Gili, A.A., Trucco, R., Niveyro, S., Balzarini, M., Estelrich, D., Quiroga, A., Noellemeyer, E., 2010. Soil Texture and Carbon Dynamics in Savannah Vegetation Patches of Central Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 647. doi:10.2136/sssaj2009.0053

Gregoret, M.C., Dardanelli, J., Bongiovanni, R., Díaz-Zorita, M., 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol.

Cienc. del suelo 24, 147–159.

Hendershot, W.H., Lalonde, H., 2006. Chapter 18 Ion Exchange and Exchangeable Cations, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition. CRC Press, Inc.

INTA, Gobierno de La Pampa, Universidad Nacional de La Pampa, 1980. Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa.

Jenny, H., 1941. *Factors of soil formation a system of quantitative pedology*, Soil Science. McGraw Hill, New York.

Mulder, V.L., de Bruin, S., Schaepman, M.E., Mayr, T.R., 2011. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. *Geoderma* 162, 1–19.  
doi:10.1016/j.geoderma.2010.12.018

Phillips, J.D., Van Dyke, C., 2017. State-and-transition models in geomorphology. *CATENA* 153, 168–181. doi:10.1016/j.catena.2017.02.009

Quiroga, A., Funaro, D., Noellemeyer, E., Peinemann, N., 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 90, 63–68. doi:10.1016/j.still.2005.08.019

Quiroga, A.R., Funaro, D.O., Fernandez, R., Noellemeyer, E.J., 2005. Soil and management factors that condition fallow efficiency in the Pampa Region | Factores edáficos y de manejo que condicionan la eficiencia del barbecho en la Región Pampeana. *Cienc. del Suelo*.

Schaetzl, R.J., 2013. *Catenas and Soils*, Treatise on Geomorphology. Elsevier Ltd.  
doi:10.1016/B978-0-12-374739-6.00074-9

Skjemstad, J.O., Baldock, J. a, 2006. Chapter 21 Total and Organic Carbon, in: Carter, M.R., Gregorich, E.G. (Eds.), *Industrial Research*. Canadian Society of Soil Science.

- Soil Survey Staff., 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA NRCS.
- Stevens, F., Bogaert, P., Van Oost, K., Doetterl, S., Van Wesemael, B., 2014. Regional-scale characterization of the geomorphic control of the spatial distribution of soil organic carbon in cropland. *Eur. J. Soil Sci.* n/a-n/a. doi:10.1111/ejss.12153
- Urricariet, S., Niborski, M., Kvolek, C.M., 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Cienc. del suelo* 29, 49–59.
- USDA, S.C.S., 1961. Land Capability Classification, *Agricultur. ed.* USDA Soil Conservation Service.
- USDA Soil Survey, 2009. Examination and Description of Soils, in: *Soil Survey Manual 2.* pp. 1–110.
- Vázquez, P., 2014. La ecuación suelo-paisaje, los sensores remotos y la actualización de la cartografía edáfica de la provincia de La Pampa. *EEA Anguil “Ing. Agr. Guillermo Covas” Inst. Nac. Technol. Agropecu.* 98, 12.
- Viglizzo, E.F., Jobbágy, E., 2010. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental 103.