

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**RECONSTITUCIÓN DE PERFILES DE SUELOS EROSIONADOS EN LADERAS
CON DISTINTA EXPOSICIÓN DE LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

FREDDY MAURICIO MUÑOZ RODRÍGUEZ

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**RECONSTITUCIÓN DE PERFILES DE SUELOS EROSIONADOS EN LADERAS
CON DISTINTA EXPOSICIÓN DE LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

**PROFILE RECONSTRUCTION OF ERODED SOILS ON HILLSIDES OF
DIFFERENT EXPOSURES AT THE COQUIMBO REGION, CHILE.**

FREDDY MAURICIO MUÑOZ RODRIGUEZ

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**RECONSTITUCIÓN DE PERFILES DE SUELOS EROSIONADOS EN LADERAS
CON DISTINTA EXPOSICIÓN DE LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo

FREDDY MAURICIO MUÑOZ RODRÍGUEZ

Profesores Guías	Calificaciones
Sr. Manuel Casanova P. Ingeniero Agrónomo, M. S.	7,0
Sr. Marco Pfeiffer J. Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc.	6,7
Profesores Evaluadores	
Sr. Víctor García de Cortázar G. de C. Ingeniero Agrónomo, Dr. Ing.	7,0
Sr. Ricardo Pertuzé C. Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,8
Colaborador	
Sr. Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr.	

Santiago, Chile

2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por darme la oportunidad de finalizar este proceso y por guiar siempre mi camino.

Un agradecimiento a mis padres Alejandro Muñoz y Bélgica Rodríguez por todo su trabajo y dedicación, y por todas sus enseñanzas de perseverancia y responsabilidad. Este logro se los dedico como un obsequio a tanto amor y comprensión. A mis hermanos Edgard, Lorena y Diego que siempre estuvieron brindándome su apoyo y cariño incondicional.

A mi macaco por estar conmigo siempre, apoyarme cuando el estrés estuvo a punto de rendirme y por todo el amor y paciencia que tuvo en este proceso. Sin duda me hiciste todo mucho más fácil.

A mi profesor guía Manuel Casanova por toda su dedicación y compromiso para que este proceso pudiese cumplirse de manera exitosa. Muchas gracias por sus consejos y por tanto tiempo dedicado para este fin.

A mis grandes amigos que formaron parte de este proceso y que siempre estuvieron para apoyarme. Muchas gracias Carlitos, Mely, Dani, Matías, Mariela, Payo y Dynka por tantas horas de estudio y relajo, por todos los buenos y malos momentos que pasamos juntos. Siempre estarán en mi corazón.

A mi amigo Felipe Reyes por tantos buenos momentos que hemos compartido por más de 10 años de amistad. Muchas gracias por tu amistad e incondicionalidad.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo general	6
Objetivos específicos.....	6
MATERIALES Y MÉTODOS	7
Antecedentes del lugar de estudio	7
Metodología.....	7
Evaluación de propiedades químicas y físicas	9
Análisis de resultados	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
Caracterización topográfica del terreno.....	11
Descripción morfológica de perfiles de suelo	12
Propiedades físicas	14
Propiedades químicas	22
Reconstitución de perfiles	28
CONCLUSIONES	35
BIBLIOGRAFÍA	36
ANEXO I	45
APÉNDICE I.....	46
APÉNDICE II	47
APÉNDICE III.....	48
APÉNDICE IV	50

RESUMEN

El análisis cuantitativo de la variabilidad de los suelos es cada vez más importante para una adecuada evaluación y manejo de este recurso. Pocas investigaciones se han desarrollado para estimar la variación en las propiedades edáficas en laderas áridas. La erosión de cárcavas es un proceso geomorfológico activo en la zona sur de la Región de Coquimbo, y se asocia a condiciones climáticas, elevados gradientes de pendiente y pastoreo intensivo. La productividad se ha reducido debido a los efectos de la erosión, la cual varía según la posición en la que se encuentre el pedón y el aspecto de la pendiente.

Para evaluar los efectos de la producción intensiva en las propiedades edáficas se empleó la técnica de reconstitución de perfiles de suelo, con el fin de evaluar la magnitud y los alcances de la erosión en la Región analizada. Los suelos cultivados fueron comparados con su condición original, identificándose cambios morfológicos, físicos y químicos. Para ello se seleccionaron pedones en un transecto realizado desde una ladera de exposición ecuatorial con cárcavas basales a otra de exposición polar sin rasgos erosivos. Se realizó un levantamiento altimétrico y descripciones de los pedones, analizando horizontes genéticos en términos morfológicos, químicos y físicos. A su vez, se determinó el volumen de suelo asociado a la formación de cárcavas en la ladera erosionada, estimando pérdidas de partículas de suelo, MO y macronutrientes totales.

Al comparar ambas laderas, se advierte en general condiciones físicas y químicas más favorables en la de exposición polar. Los pedones más bajos en la ladera presentan texturas más finas y condiciones físicas y químicas restrictivas al crecimiento radical, unido a un menor contenido de materia orgánica (MO). De acuerdo al análisis de reconstitución de perfiles, el pedón más completo presentó una secuencia de horizontes A-Bt-Bz-Cz, encontrándose perfiles truncados en la base de la ladera erosionada. El volumen de suelo estimado como pérdida producto de la formación de cárcava fue de 142 m^3 y se asocia no sólo a una pérdida de partículas de suelo, sino también a una completa desaparición de MO y macronutrientes. Como consecuencia de la erosión acelerada, las pérdidas alcanzan a: 5.237, 1.293 y 2.458 Mg ha^{-1} de arena, limo y arcilla, respectivamente. La pérdida de macronutrientes fue de 3 (N), 45 (P) y 44 (K) Mg ha^{-1} , mientras que el carbono orgánico disminuyó entre 51 y 77% de su condición original, correspondiente a 11 Mg ha^{-1} de pérdida. En este contexto, los procesos observados de erosión acelerada contribuyen a reducir la fertilidad y resiliencia del suelo, resultando imperativo adoptar medidas preventivas contra la degradación de suelos.

Palabras clave: Cárcava, laderas, perfiles de suelo truncados.

ABSTRACT

Quantitative information on soil variability has become increasingly important for soil assessment and management. There have been scarce researches in order to estimate the vertical variation in soil attributes at arid hillslope positions. Gully erosion is an active geomorphic process in the southern of Coquimbo Region and is mostly associated to climate conditions, steep slopes gradients and intensive grazing. There has been a substantial loss of productivity due to the effects of erosion, which vary with the slope aspect and the position of the pedons in the landscape.

Soil profiles reconstruction technique is used to evaluate the effects of cultivation in soil properties. Cultivated soils are compared to match native soils and an evaluation of the physical, chemical and morphological changes are made. This technique was used to assess the magnitude and extent of soil erosion on studied Region. Several pedons were selected in a transect that go from an equatorial aspect slope with basal gullies to a polar exposure slope without erosive features. A theodolite survey and a description of several soil pits were realized, analyzing genetic horizons in morphological, physical and chemical terms. In addition, the soil volume associated with gullies was determined, estimating losses of soil particles, OM and essential total macroelements.

Comparing both hillsides, in general a more favorable physical and chemical conditions in polar exposure was observed. Pedons on the lower part of eroded hillsides slope presents lower content of soil OM, finer soil textures and both physical and chemical conditions that restrict plant roots growth. According to the profile reconstruction analysis, the most complete pedon probably has an horizon sequence of A-Bt-Bz-Cz and truncated profiles are observed at the eroded hillslope positions. The estimated loss of soil volume was of 142 m^3 and associated not only to soil particles loss, but also a complete OM and macronutrients disappearance. Therefore, resulting of accelerated erosion process, losses of materials reach to 5237, 1293 and 2458 Mg ha^{-1} of sand, silt and clay, respectively. Macroelements losses are of 3 (N), 45 (P) and 44 (K) Mg ha^{-1} and losses of organic carbon reach to 51 to 77% of original content, i.e. around 11 Mg ha^{-1} . In this context, the accelerated processes observed contribute to reduce the fertility and resilience of soils, being imperative to take preventive measures against soil degradation.

Key words: Gully, hillsides, truncated soil profiles.

INTRODUCCIÓN

La Región de Coquimbo presenta características de alta erosividad en sus precipitaciones (Flores *et al.*, 2010), lo que junto a la alta erodabilidad de los suelos (Santibáñez *et al.*, 2008) y las malas prácticas silvoagropecuarias, ha generado gran pérdida de suelos provocando la formación de rasgos tales como cárcavas de gran profundidad. La presencia de este tipo de rasgos resulta tremendamente alarmante, debido a que promueven la redistribución de partículas de suelo y tiende a acelerar considerablemente los procesos de desertificación (Valentin *et al.*, 2005).

La agricultura en laderas que se desarrolla en este tipo de ambientes, se asocia a una alternancia entre sobrepastoreo y un tipo de agricultura de subsistencia que promueven la degradación del suelo (Homer y Casanova, 2011). Según Evans (1998), el sobrepastoreo provoca un aumento en las tasas de escorrentía como consecuencia de la eliminación de biomasa vegetal y la disminución de la estabilidad de agregados al encontrarse el suelo desnudo. Esta práctica, junto con la aplicación de distintos manejos degradantes y el escaso conocimiento de las características del suelo, inciden en aumentar las tasas de erosión de los sistemas agrícolas desarrollados en laderas.

El aspecto de la pendiente adquiere gran relevancia al desarrollar cualquier sistema productivo en laderas, debido a que aquellas que presentan aspecto ecuatorial poseen suelos con menor contenido de agua que las de exposición polar (Munro and Huang, 1997; Gómez-Plaza *et al.*, 2001), incidiendo en el establecimiento de una cobertura vegetal y en los contenidos de materia orgánica del suelo. De este modo, los suelos desarrollados en exposición ecuatorial tienden a ser más erodables que los de aspecto polar, evidenciándose marcadas diferencias en las tasas de infiltración de agua y en su evolución pedológica (Churchill, 1982; Cerdà, 1997).

La topografía del terreno es uno de los aspectos de mayor relevancia al evaluar las tasas de erosión de un determinado lugar, debido a que es capaz de reforzar o atenuar la fuerza de los procesos erosivos (Hilley and Coutand, 2010). Al respecto, Peeters *et al.* (2006) señalan que la topografía no es constante sino que varía en el tiempo, modificándose iterativamente producto del desprendimiento de partículas del suelo que luego son depositadas en puntos de menor altitud (Figura 1). Según Phillips *et al.* (1999), la redistribución de partículas de suelo está influenciada por el manejo del terreno, las propiedades del suelo, la época del año y características del relieve como la forma de la ladera y la posición dentro de ésta.

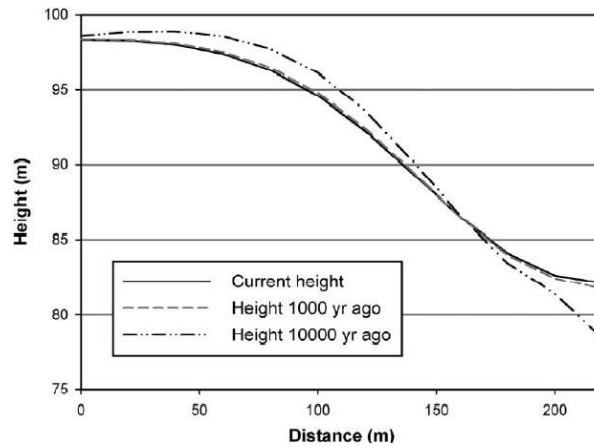


Figura 1. Comparación entre topografía antigua y actual de un perfil bidimensional de una ladera (Peeters *et al.*, 2006).

La redistribución de partículas de suelo y su consecuente cambio en la topografía del paisaje contribuyen significativamente a la formación de cárcavas, lo que conlleva una reducción del potencial productivo del suelo (Vanwalleghem *et al.*, 2005). Según Oostwoud Wijdenes *et al.* (1999), la forma y el desarrollo de las cárcavas que se generan por el desprendimiento de partículas, están directamente influenciados por las características morfológicas que presenta el suelo, principalmente en la cabecera de dichas cárcavas.

Morgan (2005) señala que la formación de una cárcava comienza con una pequeña depresión que se forma al debilitarse la cobertura vegetal del suelo. El agua tiende a concentrarse en dicha depresión ampliándola hasta unirse a otras similares, formándose un canal incipiente en el cual el desprendimiento de partículas de suelo se concentra en su parte más alta, desarrollando escarpes casi verticales donde se produce un flujo supercrítico que promueve la erosión. Esto genera una profundización del canal y un debilitamiento del suelo, produciendo un colapso y el retroceso del canal hacia arriba en la pendiente junto a un aumento de su sección transversal (Figura 2).

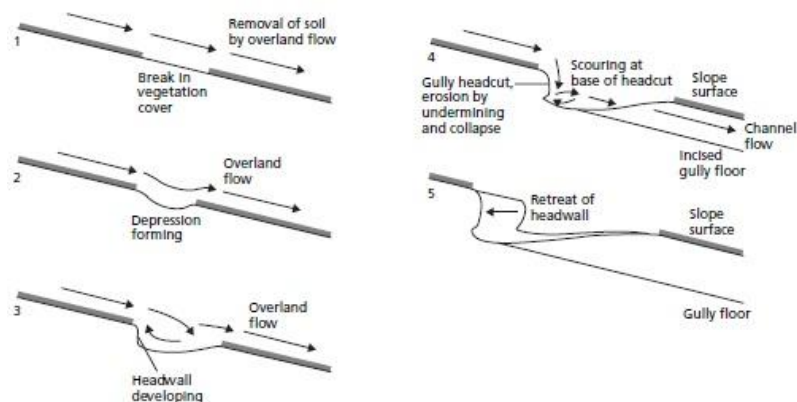


Figura 2. Etapas en el desarrollo de cárcavas en una ladera (Leopold *et al.*, 1964; citado por Morgan, 2005).

Al comparar el área de desprendimiento de partículas de suelo con la zona de descarga en una ladera, se observa que el desarrollo de cárcavas profundas promueve considerablemente la salida de dichas partículas desde pequeñas cuencas y provoca un aumento de la producción de sedimentos (Vanwalleghem *et al.*, 2005). Para determinar el volumen de suelo que se pierde por la formación de cárcavas, se han desarrollado diversas ecuaciones que relacionan el volumen de la cárcava con su longitud, área o gradiente de pendiente (Rustomji, 2006; Muñoz-Robles *et al.*, 2010; Kompani-Zare *et al.*, 2011); no obstante, la utilización de este tipo de relaciones debe llevarse a cabo cuidadosamente, considerando las características específicas de cada lugar en particular (Frankl *et al.*, 2013).

La aplicación de distintas prácticas de conservación de suelos en zonas semiáridas ha contribuido a reducir considerablemente las tasas actuales del avance de cárcavas tanto en longitud, como en superficie y volumen (Frankl *et al.*, 2012), destacándose el uso de cubiertas vegetales, labranza cero o mínima, líneas de piedra y terrazas, entre otras; sin embargo, estas técnicas son raramente adoptadas por los agricultores, puesto que su introducción no suele asociarse a un rápido beneficio en términos de un aumento de la superficie o de la productividad (Valentin *et al.*, 2005; Moges and Holden, 2008). A su vez, para conocer la magnitud de la pérdida de suelo producida por la erosión se han llevado a cabo diversos métodos, entre los que se encuentran el uso de clavos, perfilómetros, parcelas de erosión, trazadores físicos, modelos de erosión y sensores remotos, entre otros (Casanova *et al.*, 2010; Zapata *et al.*, 2010); sin embargo, con la aplicación de éstos resulta difícil establecer los alcances que el proceso erosivo ha tenido en las propiedades intrínsecas del suelo.

A pesar de que los efectos de la erosión dependen en gran medida de las características que presente el suelo superficial y/o su espesor original, la naturaleza del subsuelo juega un rol primordial ante los procesos de pérdida de suelo (Brunel y Seguel, 2011). Es por este motivo que resulta imprescindible conocer el suelo en profundidad antes de adoptar alguna medida de conservación.

El perfil de un suelo es capaz de almacenar información respecto a los factores ambientales y los procesos que han actuado durante su pedogénesis (Targulian and Goryachkin, 2004). En base a esto se ha desarrollado una técnica conocida como reconstitución de perfiles de suelo, la que basada en observaciones en terreno y el análisis de distintas propiedades edáficas, permite identificar los cambios ocurridos en el suelo producto de las variaciones ambientales y reconstruir el perfil original que existía antes de producida la alteración (Pelle *et al.*, 2013; Zwertvaegher *et al.*, 2013). Existen actualmente diversos métodos de reconstitución de perfiles de suelo, no obstante el procedimiento óptimo a utilizar es específico para cada caso en particular y dependerá de la disponibilidad de información previa de los horizontes del perfil y la finalidad de la investigación (McBratney *et al.*, 2000). La aplicación de esta técnica ha otorgado importantes beneficios en investigaciones relacionadas a la conservación de suelos, puesto que ha permitido identificar los alcances de la erosión mediante la reconstrucción cronológica de los distintos procesos de degradación basándose en las características del perfil evaluado, facilitando de este modo la adopción de estrategias apropiadas para cada sitio de estudio en particular (Yanda, 2000).

Belyaev *et al.* (2004), por ejemplo, mediante la técnica de reconstitución de perfiles de suelo, consiguieron establecer las distintas etapas del desarrollo de una cárcava durante los últimos 100 años de formación y adoptar medidas para frenar su avance y desarrollo. En Chile en cambio, la técnica de reconstitución de perfiles no ha sido utilizada en investigaciones, restando un mejor aprovechamiento de los beneficios que esta herramienta entrega al conocimiento de los procesos y factores que modifican el suelo y el paisaje.

Objetivo general

Evaluar la magnitud y los alcances de la erosión en laderas de la Comuna de Canela en la Región de Coquimbo, empleando el método de reconstitución de perfiles de suelo.

Objetivos específicos

1. Comparar rasgos morfológicos entre perfiles de suelo dentro y entre laderas erosionadas con distinto aspecto de pendiente.
2. Evaluar los cambios químicos, físicos y biológicos producto de la pérdida de suelo en laderas erosionadas.
3. Comparar propiedades físicas y químicas de los horizontes entre laderas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Antecedentes del lugar de estudio

El estudio se desarrolló en la Comunidad Agrícola Angostura de Gálvez (31°26'49,83'' LS - 71°33'54,92'' LW) perteneciente a la Comuna de Canela, Provincia de Choapa, Región de Coquimbo, a unos 165 m.s.n.m. El terreno abarca una superficie aproximada de 1 hectárea y está compuesto por dos laderas adyacentes, con distinto aspecto o exposición de pendiente (ecuatorial y polar), que convergen hacia una zona de descarga de sedimentos ubicada en la base de ambas. La ladera con exposición norte (en adelante ecuatorial) presenta cárcavas profundas en su base como consecuencia de procesos erosivos severos, mientras que la ladera con exposición sur (en adelante polar) presenta signos visibles de erosión sólo en su parte media como consecuencia de la construcción de un camino perpendicular al sentido de la pendiente.

El suelo del lugar es de origen granítico y ha sido cartografiado como un misceláneo cerro, y clasificado como VIIe por Capacidad de Uso (CNR, 1993). El clima de la localidad es de tipo mediterráneo subtropical semiárido, correspondiente al distrito Canela-Atelcura (CIREN, 1990), caracterizado por la ausencia de heladas, temperaturas que oscilan entre 11 y 24°C, duración de período seco de 8 meses, precipitación promedio anual de 162,5 mm y déficit hídrico del período octubre-marzo de 640 mm.

Los antecedentes históricos del lugar dan cuenta de un sistema de agricultura de subsistencia dominado por el uso de labranza intensiva y explotación del suelo denominado "lluvias", en el que los procesos erosivos propios de terrenos inclinados carentes de protección se ven acentuados con la aradura. Esta situación marcó una tendencia en el uso del suelo por parte de las comunidades agrícolas desde mediados a fines del siglo XX, las cuales se vieron forzadas a explotar terrenos marginales para la producción agrícola y, posteriormente, asumir la alternativa de la crianza de ganado ante la oferta de forraje presente, compuesto fundamentalmente por especies herbáceas y arbustivas nativas (Jorquera, 2001; Gallardo, 2002; Gallardo 2006). Actualmente el uso que se otorga al terreno se concentra en invierno y se destina a pradera natural para la alimentación de caprinos y ovinos.

Metodología

Teniendo en consideración que a lo largo de las laderas puede producirse una sucesión pedológica caracterizada por variaciones sistemáticas en los perfiles y propiedades del suelo, donde los procesos erosivos actúan de manera distinta (Brunner *et al.*, 2004), se empleó el método de reconstitución de perfiles basado en la descripción morfológica de los perfiles de suelo, el muestreo por horizontes maestros definidos y el análisis de sus

propiedades físicas y químicas en laboratorios. Se seleccionaron pedones en un transecto realizado desde la ladera de exposición norte a la opuesta (Figura 3), utilizando como referencia aquel perfil relativamente más completo identificado para el análisis de reconstitución de perfiles (Kelly *et al.*, 1988; McBratney *et al.*, 2000).

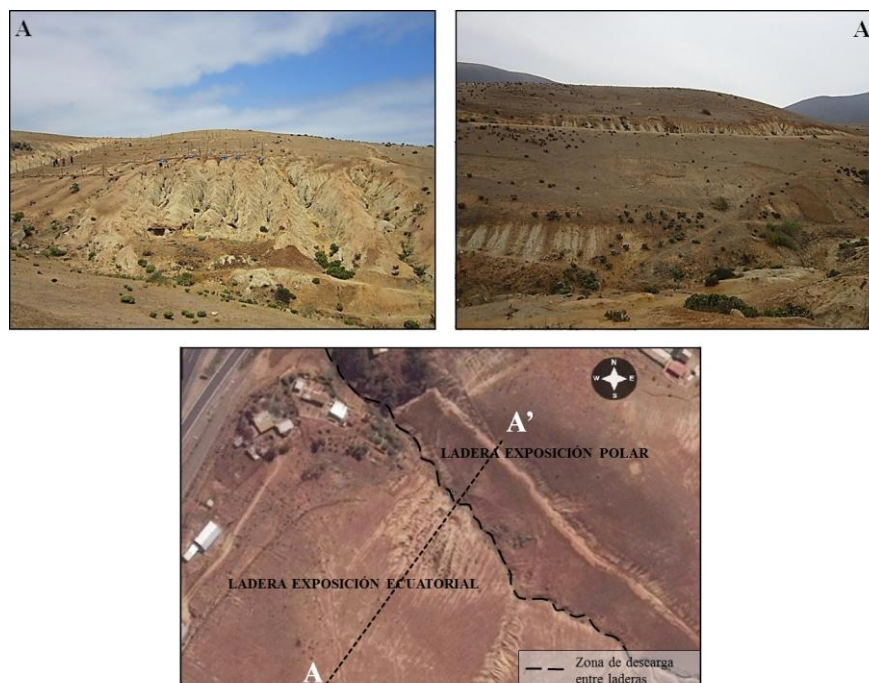


Figura 3. Ubicación del transecto (A-A') considerado en el estudio.

En la ladera de exposición ecuatorial se realizaron cuatro observaciones, las cuales se ubicaron en la divisoria de aguas, la parte media de la ladera, la cabeza de las cárcavas y en la parte basal de éstas; mientras que en la ladera de orientación sur se realizó una única observación en el corte de camino, con el fin de comparar el factor exposición. Además, se definió un punto de observación adicional ubicado en la zona de descarga de sedimentos ubicada en la base de ambas laderas, donde sólo se midió resistencia a la penetración. La nomenclatura utilizada para identificar cada lugar analizado se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Nomenclatura de los puntos de observación

Ubicación del lugar analizado	Identificación del pedón
<i>Ladera de exposición ecuatorial</i>	
Divisoria de aguas	P1-E
Ladera media	P2-E
Cabeza de cárcavas	P3-E
Base de cárcavas	P4-E
<i>Ladera de exposición polar</i>	
Corte de camino	P5-P
<i>Zona de descarga de sedimentos</i>	
Base de ambas laderas	P6

En los pedones P1-E y P2-E fue necesario realizar calicatas para identificar horizontes genéticos y realizar la descripción de los perfiles de suelo, mientras que en P3-E y P4-E se procedió a hacer una limpieza del perfil en una de las caras de la cárcava. En la ladera de exposición polar se realizó una limpieza del perfil expuesto en el pedón P5-P para posteriormente ser descrito morfológicamente (Schoeneberger *et al.*, 2012). Una vez identificados los horizontes se extrajeron muestras de suelo de cada uno, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de Química de Suelos y Aguas y en el laboratorio de Física de Suelos, ambos ubicados en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. La extracción de muestras fue llevada a cabo en los meses de julio y agosto del año 2013.

Se realizó un levantamiento altimétrico para representar el perfil del transecto analizado, el que incluyó sólo una cárcava de las numerosas identificadas en terreno. Este procedimiento se realizó mediante una nivelación trigonométrica simple desarrollada con un teodolito (Wild T16 F.Nr. 184943).

En el transecto se determinaron las cotas del canal y de la superficie del suelo en la zona de cárcavas, definiéndose un área en cada cambio de sección. La distancia horizontal entre estas áreas se estimó con un odómetro siguiendo las sinuosidades del talud. Con los datos obtenidos fue posible representar el volumen de suelo asociado a la pérdida por erosión. Luego de conocer el volumen de la cárcava se pudo establecer los alcances que el proceso erosivo tuvo en las propiedades intrínsecas del suelo, asociando este valor a los cambios producidos en las distintas propiedades edáficas.

Evaluación de propiedades químicas y físicas

Los análisis químicos se realizaron siguiendo las metodologías definidas por Sadzawka *et al.* (2006). En cada horizonte maestro se determinó el contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black, el pH en agua por potenciometría (relación 1:2,5) con pHmetro y la conductividad eléctrica con conductímetro en el extracto de saturación. Los contenidos de cationes solubles y extraíbles se determinaron mediante el método de extracto de saturación y determinación por espectrofotometría de absorción y emisión atómica, con lantano. Una vez obtenidos los resultados de laboratorio se calculó el sodio intercambiable (PSI) y la relación de adsorción de sodio (RAS).

Los contenidos totales de nitrógeno, fósforo y potasio fueron determinados por el método de Lachica *et al.* (1965), mientras que la capacidad de intercambio catiónico se midió con el método de saturación con acetato de Na a pH 8,2 (Sadzawka, 1990).

En términos físicos se emplearon las metodologías definidas por Sandoval *et al.* (2012), determinándose la textura del suelo con el hidrómetro de Bouyoucos, la densidad real con picnómetros y las constantes hídricas (a 33 kPa y 1.500 kPa) con dispositivos de ollas y plato a presión. La determinación de textura y densidad real se realizó con 3 repeticiones

por horizonte, mientras que para la retención de agua se emplearon 4 repeticiones. La densidad aparente fue medida por el método del cilindro y por el método del terrón, lo que permitió estimar la porosidad total (S), estructural (PE) y textural (PT) de cada horizonte de acuerdo a lo propuesto por Cerisola *et al.* (2005).

$$S = \left(1 - \frac{Dac}{Dr}\right) * 100 \quad (1)$$

$$PE = \left(1 - \frac{Dac}{Dat}\right) * 100 \quad (2)$$

$$PT = \left[Dac * \left(\frac{1}{Dat} - \frac{1}{Dr} \right) \right] * 100 \quad (3)$$

donde Dac es la densidad aparente evaluada con el método del cilindro, Dat corresponde a la densidad aparente evaluada con el método del terrón y Dr es la densidad real.

Finalmente, fue medida la resistencia a la penetración con un penetrológico (Eijkelkamp) en la superficie de cada pedón, con 5 repeticiones. Del mismo modo se midió en la zona de descarga de sedimentos, de cota más baja. La profundidad de las mediciones en los distintos pedones analizados cambió según la variación en la resistencia mecánica que ejercía el suelo, lo que imposibilitó que la recopilación de datos se efectuara de manera uniforme.

Análisis de resultados

Se elaboró una descripción detallada de cada perfil evaluado y se identificaron las diferencias morfológicas entre los distintos pedones analizados, para determinar los cambios ocurridos a lo largo de la ladera producto del proceso erosivo.

Los resultados obtenidos en los laboratorios fueron analizados mediante estadística descriptiva simple, con el fin de comparar los valores obtenidos en cada pedón evaluado. Se realizaron comparaciones gráficas entre los distintos pedones dentro de la ladera erosionada como también entre las laderas con distinta exposición.

Posteriormente se realizó un análisis interpretativo de las pérdidas de suelo, los cambios ocurridos en la ladera producto de los procesos erosivos y las consecuencias futuras de las variaciones en las propiedades dentro de la catena y entre laderas. Finalmente se identificaron aquellas propiedades del suelo que fueron afectadas por la formación de las cárcavas en la base de la ladera de exposición ecuatorial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización topográfica del terreno

Los resultados obtenidos a partir del levantamiento topográfico son presentados en la Figura 4. En ella es posible identificar el perfil longitudinal correspondiente al transecto analizado conjuntamente con los pedones donde se realizaron las evaluaciones. La ubicación exacta de cada pedón se presenta en el Apéndice I.

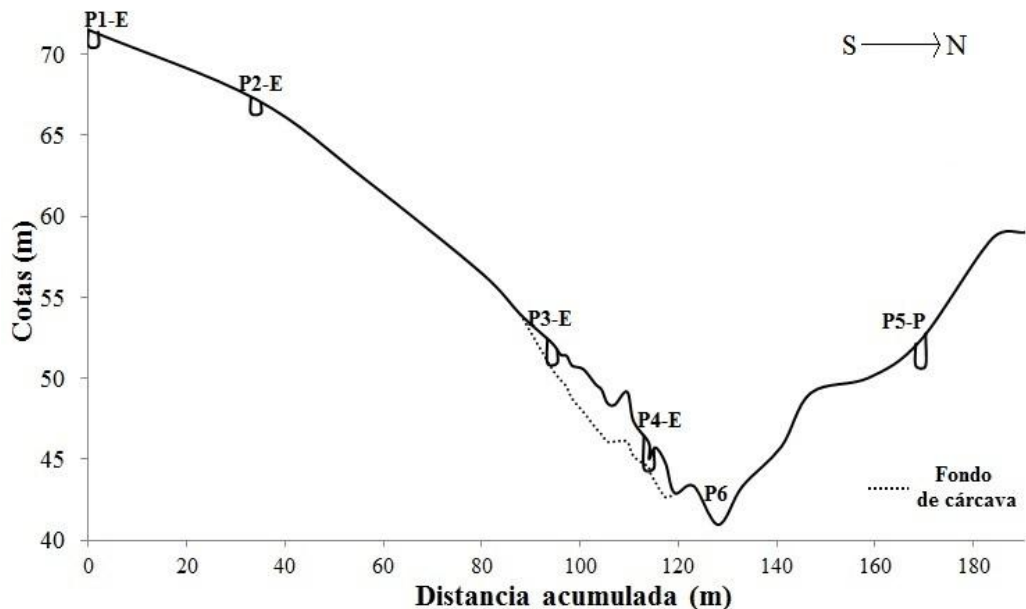


Figura 4. Perfil topográfico del lugar de estudio.

El transecto en su totalidad comprende una longitud de 190 metros (128 m de exposición ecuatorial y 62 m de exposición polar). La zona con cárcavas presenta una extensión horizontal de 31 m en la base de la ladera con exposición ecuatorial, que a su vez es 12,5 m más alta que la ladera de exposición polar.

Con relación al gradiente de pendiente, ambas laderas se advierten escarpadas, con un 25% en la ladera de exposición ecuatorial y un 29% en la ladera opuesta. La curvatura de la ladera de exposición ecuatorial es convexa, mientras que la ladera opuesta es relativamente plana, aunque en ésta es posible identificar una mayor complejidad de la pendiente, producto de la influencia de un sendero perpendicular.

El área afectada por cárcavas presenta una diferencia de altura de 11 m y la mayor profundidad alcanzada (punto 12) por la cárcava estudiada es de 2,82 m (Apéndice II). Se observa en general una forma en V de la sección transversal de la cárcava, lo que obedece a

un subsuelo con mayor resistencia al flujo que el suelo superficial, o bien a una elevada estabilidad estructural. Según Chamberlain (1990), este tipo de cárcavas tiende a profundizar pendiente abajo y crecer en longitud pendiente arriba, con pequeñas cantidades de agua que fluyen a altas velocidades.

La distancia inclinada total siguiendo las sinuosidades del talud de la cárcava, es de 42 m, valor que se utilizó en la estimación del volumen de la cárcava.

El volumen total de suelo extraído desde la ladera producto de la formación de cárcavas corresponde a 142 m³ (Apéndice II). Ciertamente este volumen representa sólo una cárcava de la red total presente en la base de la ladera, por lo cual este monto se ve enormemente incrementado, considerando que la ladera posee alrededor de 6 cárcavas de características semejantes a la evaluada.

Descripción morfológica de perfiles de suelo

Las características morfológicas de los perfiles descritos (Apéndice III), denotan que a medida que se desciende en la ladera con exposición ecuatorial, la profundidad efectiva de los perfiles se ve incrementada, siendo el pedón P4-E el más profundo con 1,8 m, situación que concuerda con los resultados obtenidos por Badía *et al.* (2013) en laderas de clima semiárido de Zaragoza. Según Lavee *et al.* (1998), esta situación es característica de ambientes semiáridos y se debe a una disminución constante en el tiempo en las tasas de infiltración, lo que contribuye a aumentar la escorrentía y las tasas de erosión, provocando que el agua y los sedimentos se depositen en las partes más bajas.

La secuencia de horizontes maestros preliminarmente descrita cambia en los distintos perfiles (Figura 5), advirtiéndose que en la cima de la ladera (P1-E) se presenta una secuencia A-B-C, seguida de una secuencia A-B1-B2-C en el pedón P2-E más bajo. A pesar de la aparición del horizonte B2 a medida que se desciende en esta ladera, es posible evidenciar que el espesor del horizonte superficial no tiene una variación relevante, como tampoco presenta un cambio importante la profundidad a la que se encuentra el horizonte C. En la zona de cárcavas la secuencia tanto para el pedón P3-E como para el P4-E es A-B (al menos hasta 1,8 m de profundidad), siendo el primer horizonte 20 cm más grueso en el perfil analizado en la base de la cárcava. Como se puede apreciar, la secuencia más completa dentro de la ladera de exposición ecuatorial se definió en P2-E, por lo cual este pedón será el que se tomará como referencia para el análisis de reconstitución de perfiles y a su vez se relacionará con el del pedón P5-P de la ladera opuesta, con el fin de contrastar el efecto que ha tenido la exposición y la erosión en el desarrollo pedológico.

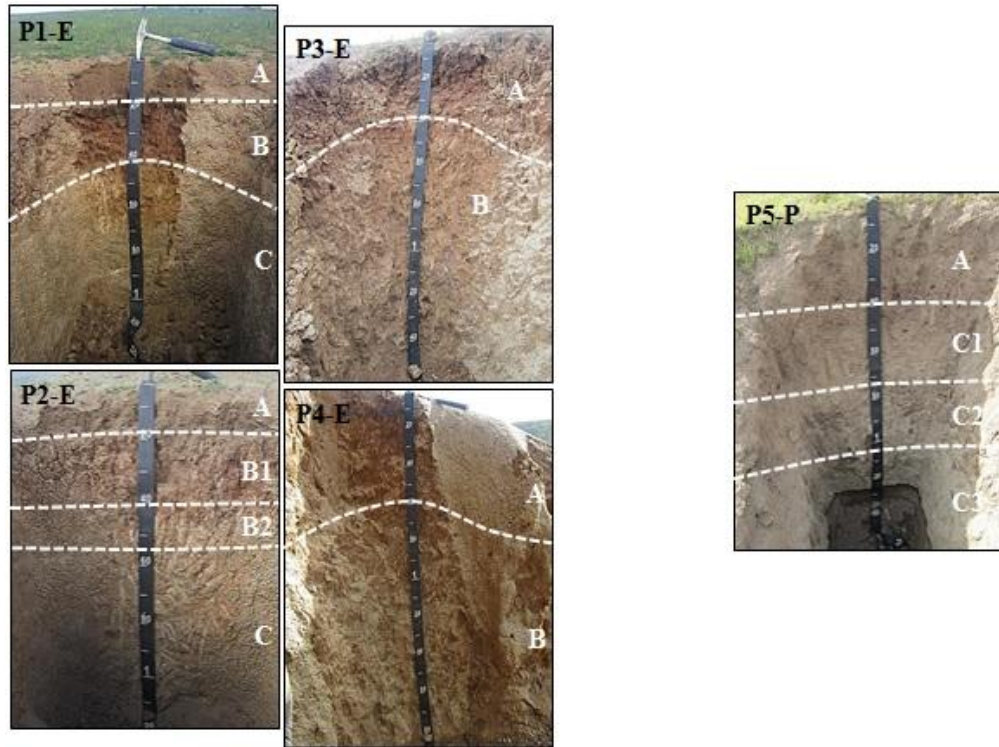


Figura 5. Perfiles de suelo analizados en el sitio de estudio. Izquierda: exposición ecuatorial (E); derecha: exposición polar (P).

Los colores de la matriz de suelo en los horizontes varían desde el matiz 7,5 YR al 10 YR, observándose que los que presentan mayor matiz se ubican en el horizonte B1 del pedón P2-E y en los horizontes A de los pedones P3-E y P4-E. Los horizontes C de los perfiles P1-E y P2-E se presentan variegados, con abundante presencia de micas.

Con respecto a las clases texturales de los horizontes, se puede apreciar que van desde arenosas (horizonte C del pedón P1-E y P2-E) hasta arcillo limosas (horizonte B1 y B2 del pedón P2-E), con gran influencia de gravas en casi la totalidad de los horizontes definidos.

La estructura es del tipo prismática en el horizonte B de P1-E, en los horizontes B1 y B2 de P2-E y en P3-E y P4-E en todos sus horizontes. En los pedones de la cima y media ladera (P1-E y P2-E, respectivamente) es posible identificar una estructura de bloques subangulares medios en superficie, mientras que en los horizontes más profundos no se observa estructura, sino un grado estructural masivo en P1-E y de grano simple en P2-E (horizontes C).

Con excepción del horizonte A de P2-E donde fue posible encontrar larvas de coleópteros y algunas lombrices, no se evidenciaron signos relevantes de actividad biológica en los perfiles evaluados. Se observó presencia de raíces finas y muy finas principalmente en los horizontes superficiales de P1-E y P2-E, mientras que en los pedones evaluados en la zona

de cárcavas esta proporción se reduce. En cuanto a la determinación de poros, se observó que en la totalidad de los perfiles el rango de tamaño varió sólo de medio a muy fino.

En toda el área de cárcavas es posible identificar una estrata característica de arrastre superficial, de aproximadamente 1 cm de espesor, cuyo color es notoriamente más claro que el suelo subsuperficial; esto es, gris claro (10 YR 7/2)s y pardo oscuro (10 YR 3/3)h.

Al comparar el perfil de la ladera de exposición polar (P5-P) con el perfil P2-E de la ladera contraria, se pueden identificar cambios en sus propiedades morfológicas. La principal diferencia es la secuencia presente en P5-P, la cual corresponde a A-C1-C2-C3, cuyos horizontes subsuperficiales no muestran un rasgo de estructura (masivo) desde los 40 cm de profundidad. El horizonte A de P5-P es 20 cm más profundo que su par ubicado en P2-E, con una textura más fina y bloques subangulares más gruesos. Los horizontes C1, C2 y C3 son considerablemente distintos al C descrito en P2-E, fundamentalmente porque no corresponde a material granítico en proceso de meteorización, sino a horizontes con color definido y textura más fina, pero sin estructura evidente. La diferencia entre los tres horizontes C de P5-P se fundamenta en cambios de color y en la resistencia que ejercen a la penetración horizontal de un puñal, siendo el horizonte C2 moderadamente resistente, mientras los otros dos presentan una mayor resistencia.

Propiedades físicas

Los resultados obtenidos en laboratorio se resumen en el Cuadro 2. En él se muestran los valores de las distintas propiedades evaluadas por pedón y horizontes descritos. Según estos resultados, los contenidos de arena, limo y arcilla fluctúan entre 45-93%, 3-21% y 3-40% respectivamente, observándose que la mayor parte de la fracción fina del suelo (≤ 2 mm) corresponde a partículas de tamaño arena (2-0,05 mm) en la totalidad de los perfiles. Además se aprecia una leve disminución en profundidad en los contenidos de arcillas (Figura 6). De acuerdo a la analítica física, se identifican horizontes argílicos (Bt) en los pedones P1-E y P2-E según requisitos exigidos por el Soil Survey Staff (2014) para estos horizontes de diagnóstico (Anexo I). Esto determina un cambio en la denominación preliminar de los horizontes maestros (Cuadro 2).

Cuadro 2. Propiedades físicas de los horizontes y perfiles estudiados.

Horiz. _{prof. (cm)}	Dac	Dat	Dr	a	L	A	W ₃₃	W ₁₅₀₀
	-----Mg m ⁻³ -----			-----(%)-----				
P1-E(A) ₀₋₁₈	1,53±0,06	1,72±0,02	2,63±0,02	72,18±0,13	15,75±0,05	12,07±0,14	10,46±0,48	5,65±0,21
P1-E(Bt) ₁₈₋₅₀	1,60±0,03	1,71±0,08	2,78±0,02	62,59±0,05	12,12±0,10	25,30±0,15	15,70±0,62	11,39±0,63
P1-E(C) ₅₀₋₁₀₀	1,80±0,04	2,09±0,02	2,84±0,01	84,18±0,12	9,79±0,03	6,04±0,11	9,65±0,83	7,98±0,67
P2-E(A) ₀₋₂₀	1,52±0,05	1,71±0,04	2,75±0,04	74,29±0,02	11,83±0,09	13,87±0,10	10,11±0,19	5,61±0,14
P2-E(Bt) ₂₀₋₄₀	1,55±0,09	1,69±0,02	2,86±0,05	61,17±0,12	9,39±0,08	29,44±0,09	16,99±0,24	13,06±0,55
P2-E(B) ₄₀₋₅₅	1,69±0,16	1,80±0,09	2,77±0,06	55,78±0,11	21,04±0,13	23,18±0,04	21,07±0,21	15,40±0,07
P2-E(C) ₅₅₋₁₀₀	1,74±0,14	1,86±0,01	2,81±0,11	93,14±0,08	3,43±0,08	3,43±0,14	11,90±1,04	10,24±0,86
P3-E(A) ₀₋₅₀	1,47±0,04	1,69±0,05	2,75±0,10	45,14±0,13	14,36±0,06	40,50±0,10	27,27±0,76	17,58±0,77
P3-E(B) ₅₀₋₁₅₀	1,78±0,03	2,00±0,02	2,89±0,00	53,46±0,10	17,27±0,02	29,27±0,03	21,78±1,02	12,48±0,39
P4-E(A) ₀₋₇₀	1,76±0,12	2,00±0,05	2,83±0,02	61,13±0,90	13,65±0,04	25,23±0,02	15,87±0,65	9,27±0,80
P4-E(B) ₇₀₋₁₈₀	1,79±0,00	2,15±0,02	2,78±0,05	63,57±0,11	13,10±0,04	23,33±0,05	15,84±1,19	8,14±0,64
P5-P(A) ₀₋₄₀	1,48±0,08	1,78±0,01	2,76±0,00	71,68±0,04	5,26±0,10	23,06±0,01	10,56±0,41	4,68±0,28
P5-P(C1) ₄₀₋₇₂	1,43±0,09	1,98±0,09	2,76±0,03	71,69±0,12	13,95±0,08	14,36±0,15	9,25±0,56	4,17±0,08
P5-P(C2) ₇₂₋₁₀₃	nd	2,00±0,04	2,78±0,02	66,18±0,02	11,07±0,09	22,75±0,03	15,67±0,60	9,92±0,51
P5-P(C3) ₁₀₃₋₁₃₅	nd	2,01±0,01	2,77±0,04	63,02±0,12	12,74±0,10	24,24±0,11	16,44±0,93	7,93±0,41

Valores presentados con desviación estándar (S), nd: no determinado, Dac: densidad aparente con cilindro, Dat: densidad aparente con terrón, Dr: densidad real, a: arena, L: limo, A: arcilla, W₃₃: contenido gravimétrico de agua a 33 kPa, W₁₅₀₀: contenido gravimétrico de agua a 1.500 kPa.

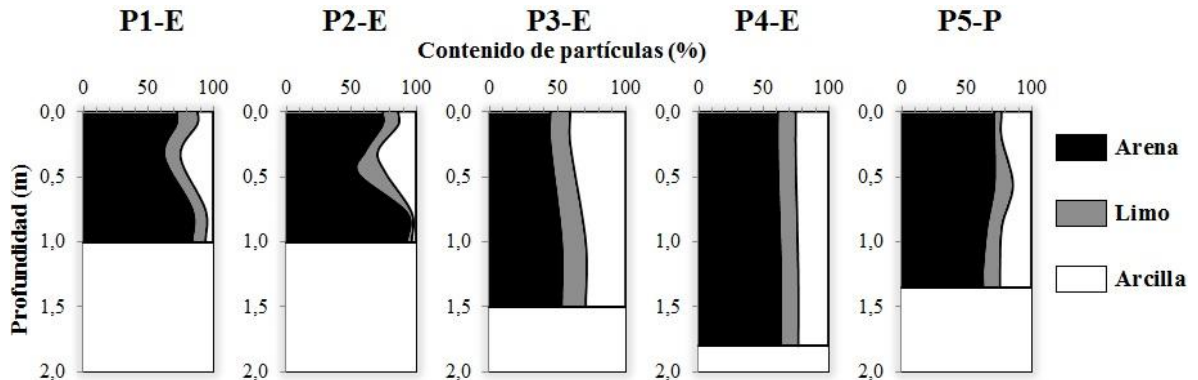


Figura 6. Distribución en profundidad de separados texturales en los pedones evaluados.

Se aprecia una textura más homogénea a medida que se descende en la ladera de exposición ecuatorial, siendo P4-E el que presenta mayor uniformidad a lo largo del perfil. Si se considerara únicamente la textura como factor determinante en las propiedades hidráulicas del suelo, se podría inferir una elevada conductividad hidráulica y baja capacidad de retención de agua en los pedones evaluados producto de su alto contenido de arena (Rawls *et al.*, 1982), superior al 45% en todos los horizontes (Figura 7); sin embargo, se ha documentado abundantemente la influencia de otras propiedades edáficas como el contenido de materia orgánica y la estructura del suelo en tal característica (Kutílek, 2004; Lado *et al.*, 2004; Lipiec *et al.*, 2007).

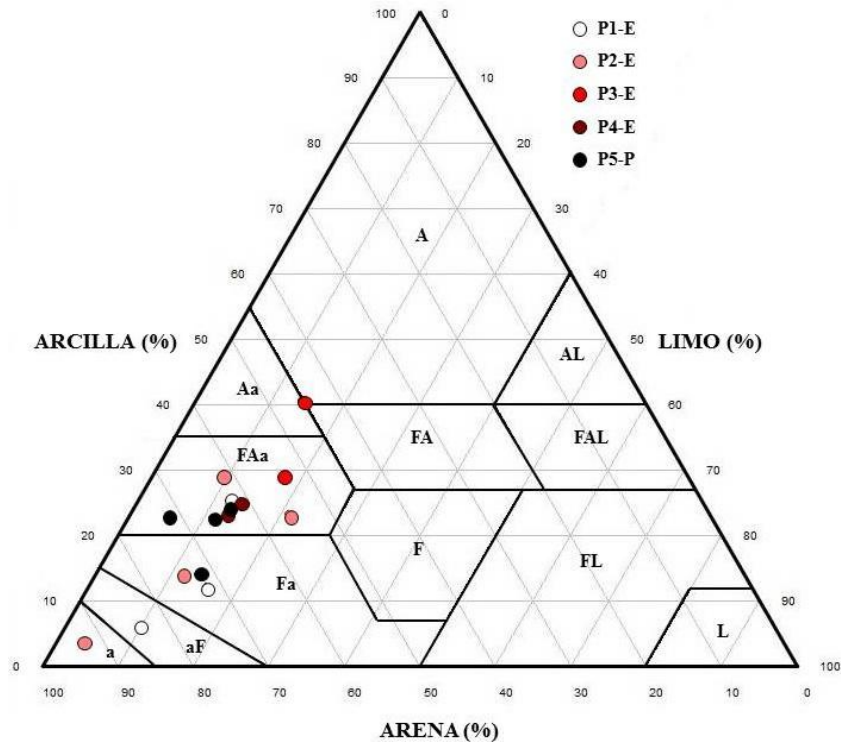


Figura 7. Clases texturales de los horizontes evaluados.

En la ladera de exposición ecuatorial se observa que los perfiles tienden a presentar texturas más finas a medida que se desciende en ella, obteniendo valores superiores de arcillas en la zona de cárcavas (23-40%), respecto a la parte más alta de la ladera (3-29%). Este hecho es observado en toposecuencias de similares características (Albanesi *et al.*, 2003; Khomo *et al.*, 2011), pudiendo inferirse una mayor tasa de meteorización en la parte basal de la ladera (Furbish and Fagherazzi, 2001), o bien una redistribución de partículas finas pendiente abajo producto del flujo de agua.

Al realizar la comparación entre P5-P de la ladera con exposición polar y P2-E de la ladera opuesta, se observa que la primera posee mayor proporción de arcillas en todo el perfil, lo que puede deberse a una menor demanda evaporativa que genera contenidos de agua superiores (Cerdà, 1997; Munro and Huang, 1997; Casanova *et al.*, 2000), contribuyendo a un aumento en la tasa de meteorización en relación a la ladera opuesta (Churchill, 1982).

Los valores de densidad de partículas (D_r) oscilan entre 2,63 y 2,89 Mg m^{-3} (Cuadro 2), ubicándose dentro del rango observado para materiales graníticos (2,33-2,94 Mg m^{-3}) dependiendo de su composición mineralógica (Tenzer *et al.*, 2011). No se observa una tendencia en profundidad dentro de los perfiles evaluados (Figura 8); sin embargo, se observa que los valores inferiores se presentan generalmente en superficie (a excepción de P4-E), debido posiblemente al aporte de materia orgánica en invierno por el crecimiento de pradera, lo que promueve una disminución de la D_r del suelo (Seguel *et al.*, 2003).

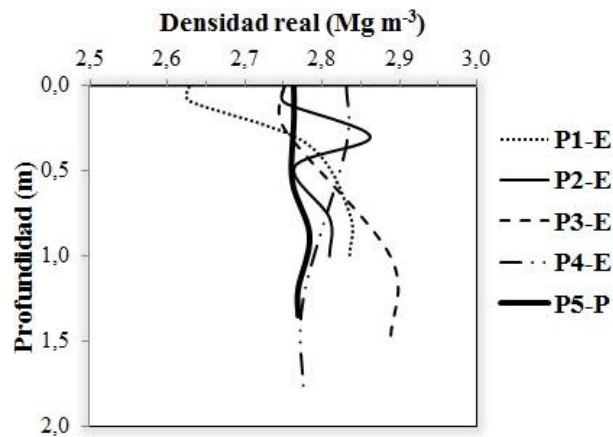


Figura 8. Densidad real en profundidad para los distintos pedones analizados.

Los resultados obtenidos de densidad aparente (D_a) por el método del cilindro (Cuadro 2) varían de valores medios ($1,43 \text{ Mg m}^{-3}$) a altos ($1,80 \text{ Mg m}^{-3}$) de acuerdo a Casanova *et al.* (2006). Dichos autores precisan que en relación con la clase textural, en horizontes arenosos y francos se advierte restricción para el crecimiento de raíces con valores $> 1,6$ a $1,8 \text{ Mg m}^{-3}$, en horizontes limosos con valores $> 1,4$ a $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$, mientras que en horizontes arcillosos es más variable, observándose problemas serios con densidades aparentes $> 1,3 \text{ Mg m}^{-3}$. En este sentido, acorde a la clase textural definida en cada horizonte, en P1-E se observa una restricción al crecimiento radical a partir del horizonte C (50 cm) y en P2-E a partir del horizonte B (40 cm), mientras que en los pedones más bajos del transecto (P3-E y P4-E) se aprecian valores restrictivos a lo largo de todo el perfil evaluado. En contraste, en la ladera opuesta, no se encuentran valores de D_a que restrinjan el crecimiento radical en ninguno de sus horizontes.

Se observa que los valores de D_a más altos se ubican a mayor profundidad dentro de los perfiles, con excepción del pedón P5-P que muestra una leve disminución a los 50 cm de profundidad (Figura 9). Según Farías *et al.* (2007) este aumento de la D_a en profundidad se debe a una tendencia natural provocada por el peso cada vez mayor que deben soportar las partículas mientras más profundas se encuentren dentro del pedón.

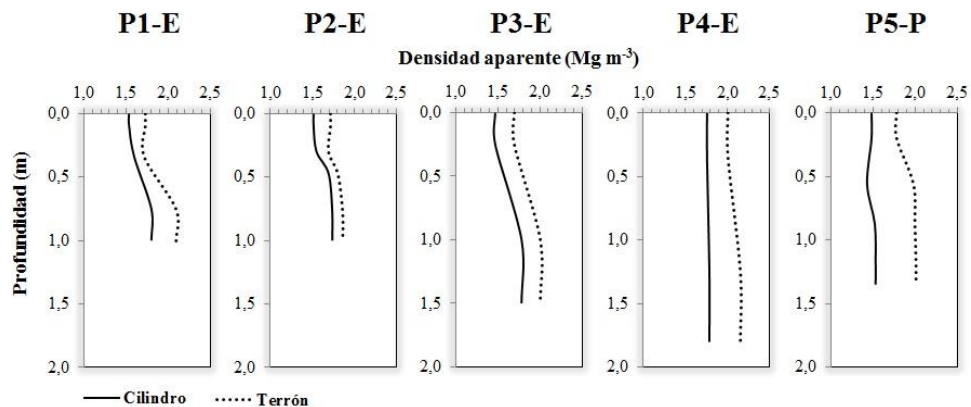


Figura 9. Variación de la densidad aparente del suelo en profundidad.

En P5-P no fue posible la medición de los últimos dos horizontes (C2 y C3) con cilindro, debido a su consistencia extremadamente dura, por lo que se realizó una estimación en base a los valores obtenidos de los terrones (Matus *et al.*, 2002). Los valores estimados fueron 1,52 y 1,53 Mg m⁻³ para los horizontes C2 y C3, respectivamente. La determinación realizada a través del método del terrón otorgó valores de densidad aparente entre 1,69 y 2,15 Mg/m³ (Cuadro 2), aumentando a mayor profundidad en todos los perfiles analizados.

En el Cuadro 3 se incluyen los valores de porosidad total (*S*), estructural (*PE*) y textural (*PT*) para cada horizonte (ecuaciones 1 a 3).

Cuadro 3. Tipos de porosidad medidas en los pedones analizados.

Horiz. _{prof. (cm)}	<i>S</i>	<i>PT</i>	<i>PE</i>
	----- (%) -----		
P1-E(A) ₀₋₁₈	41,66	30,61	11,05
P1-E(Bt) ₁₈₋₅₀	42,63	35,85	6,79
P1-E(C) ₅₀₋₁₀₀	36,54	22,68	13,86
P2-E(A) ₀₋₂₀	44,91	33,59	11,33
P2-E(Bt) ₂₀₋₄₀	45,86	37,71	8,15
P2-E(B) ₄₀₋₅₅	38,72	32,94	5,78
P2-E(C) ₅₅₋₁₀₀	38,18	31,78	6,41
P3-E(A) ₀₋₅₀	46,61	33,56	13,05
P3-E(B) ₅₀₋₁₅₀	38,34	27,36	10,98
P4-E(A) ₀₋₇₀	37,89	25,69	12,20
P4-E(B) ₇₀₋₁₈₀	35,64	18,67	16,97
P5-P(A) ₀₋₄₀	46,41	29,87	16,55
P5-P(C1) ₄₀₋₇₂	48,28	20,51	27,77
P5-P(C2) ₇₂₋₁₀₃	45,53	21,53	24,00
P5-P(C3) ₁₀₃₋₁₃₅	44,89	20,89	24,00

Porosidad total (*S*), textural (*PT*) y estructural (*PE*).

La porosidad total (*S*) de los horizontes evaluados presenta valores medios (35,6% a 46,6%) de acuerdo a Casanova *et al.* (2006), siendo mayores en superficie en todos los perfiles analizados, lo que favorece la infiltración del agua al pedón; sin embargo, al encontrarse el suelo seco la mayor parte del año se podría generar un déficit hídrico, motivo por el cual el agua que es aportada a través de las primeras lluvias de invierno podría ser retenida inicialmente por los poros de la matriz (*PT*), para posteriormente formar parte del agua que se mueve en el pedón a través de la *PE* (Kutílek, 2004).

No se percibe una tendencia de cambio en *S* entre P1-E y P4-E, sin embargo este último es el que presenta los valores más bajos. La mayor influencia en la *S* de los horizontes analizados es la *PT*, la cual llega a ser 4 veces superior que la *PE* en algunos horizontes (horizonte Bt de P2-E). El perfil analizado en la ladera de exposición polar posee uno de los mayores valores de *S* superficial en relación a los perfiles de la ladera contraria, apreciándose una clara influencia de la *PE* a lo largo de todo el pedón P5-P. Los resultados anteriores indicarían un mayor dominio de la microestructura, no apreciable a simple vista en exposición polar (Tisdall and Oades, 1982; Nimmo, 1997).

Los valores de resistencia a la penetración (RP) indican cierta restricción al crecimiento de raíces según el valor umbral de 2 MPa propuesto por Taylor and Brar (1991). La mayoría de los pedones analizados sobrepasan considerablemente este valor en los primeros 10 cm de profundidad (Figura 10), siendo el más crítico el ubicado en la parte inferior de las cárcavas (P4-E), de 3,26 MPa en los primeros 5 cm (ver Apéndice IV).

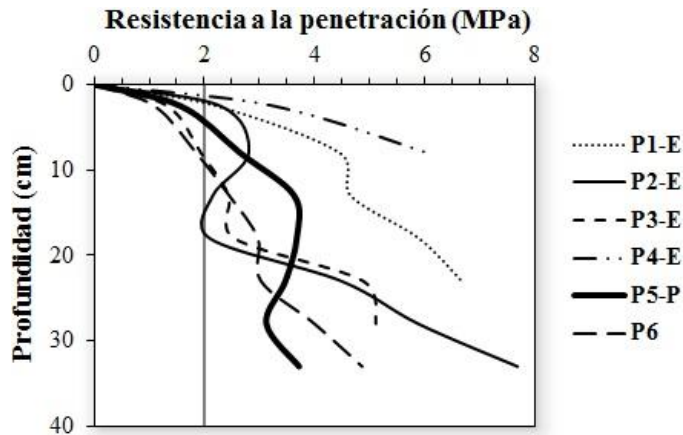


Figura 10. Resistencia a la penetración del suelo en los pedones analizados.

Se observa que en todos los pedones evaluados la RP aumenta en profundidad debido a factores pedológicos (Horn *et al.*, 2007), siendo los pedones P1-E y P4-E considerablemente distintos al resto, con valores muy altos en los primeros 20 cm de profundidad (Schoeneberger *et al.*, 2012). En P2-E (perfil de referencia) se observa un aumento de RP en los 10 cm más superficiales, con valores altos hasta los 20 cm, concordando con el cambio de horizonte A al Bt. Desde esta profundidad la RP se incrementa a valores muy altos linealmente hasta los 35 cm, punto en el cual se dificulta la toma de datos con el penetrológico. Estos resultados indican una gran dificultad para incrementar la cobertura del suelo debido a la RP ejercida por los horizontes subsuperficiales al crecimiento de raíces.

Los contenidos gravimétricos de agua (W) a 33 kPa fluctúan entre 9,3 y 27,3%, mientras que a 1.500 kPa varían entre 4,2 y 17,6% (Cuadro 2). En la zona con cárcavas se observa una mayor uniformidad en la capacidad de retención de agua a lo largo de los perfiles de suelo (pedones P3-E y P4-E), mientras que en los pedones más elevados de la ladera de exposición ecuatorial, los horizontes A poseen menores valores de retención de agua que los subsuperficiales (Figura 11), en respuesta a las clases texturales más gruesas.

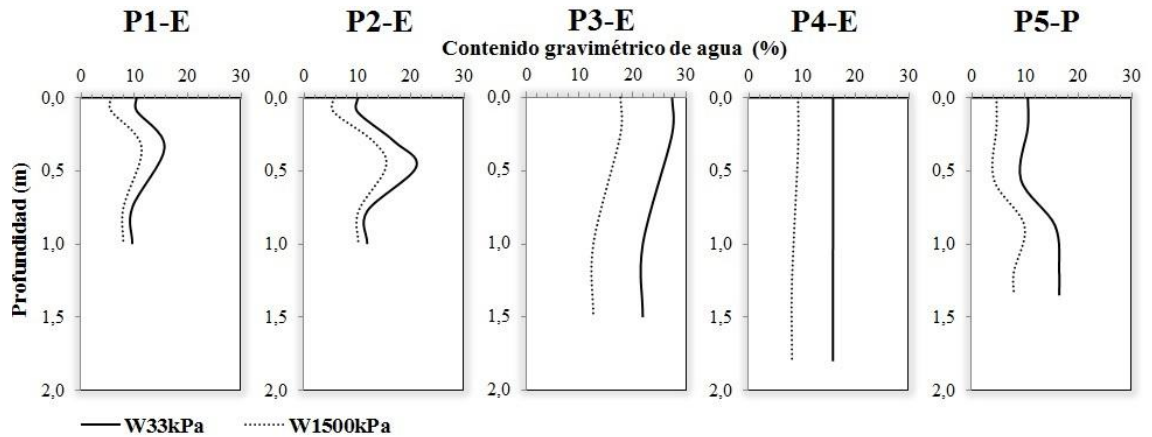


Figura 11. Variación del contenido gravimétrico de agua en los pedones a 33 y 1500 kPa.

Los resultados obtenidos evidencian una variación en el contenido volumétrico (θ) de los horizontes analizados (Cuadro 4), de 13-40% para 33 kPa y 6-26% para 1.500 kPa, siguiendo una tendencia similar a los valores de contenido gravimétrico.

Cuadro 4. Contenido volumétrico y agua aprovechable de cada perfil estudiado.

Horizonte	θ_{33}	θ_{1500}	Fg	Espesor	AA
	(%)				
P1-E				100	3,64
A	16,04	8,67	35,0	18	0,86
Bt	25,05	18,18	25,0	32	1,65
C	17,37	14,36	25,0	50	1,13
P2-E				100	4,67
A	15,33	8,51	47,5	20	0,72
Bt	26,34	20,24	0,0	20	1,22
B	35,71	26,10	0,0	15	1,44
C	20,67	17,79	0,0	45	1,29
P3-E				150	16,16
A	40,05	25,83	47,5	50	3,73
B	38,80	22,23	25,0	100	12,42
P4-E				180	15,62
A	27,92	16,31	47,5	70	4,27
B	28,30	14,54	25,0	110	11,36
P5-E				135	8,65
A	15,64	6,93	47,5	40	1,83
C1	13,22	5,96	25,0	32	1,74
C2	23,46	14,85	25,0	31	2,00
C3	24,77	11,95	25,0	32	3,08

Fg: fragmentos gruesos (> 2 mm), AA: agua aprovechable asumida capacidad de campo y punto de marchitez permanente a 33 y 1.500 kPa, respectivamente [AA= $(\theta_{33} - \theta_{1500}) * \text{espesor} * (1 - \text{Fg})$].

En el Cuadro 4 se puede apreciar que el mayor contenido de AA se encuentra en los pedones de la base de la ladera de exposición ecuatorial, dando cuenta de un posible

movimiento o acumulación de partículas finas en la base de la ladera, o bien de un aumento del contenido de arcillas en la zona de cárcavas producto de un grado de meteorización más avanzado (Lebedeba *et al.*, 2010; Maher, 2010; Mudd *et al.*, 2013).

La ladera de exposición polar presenta mayor contenido de AA que la ladera opuesta (Figura 12). Este comportamiento se asocia a la influencia de texturas más finas presentes en P5-P en relación al pedón P2-E, lo que junto a una menor demanda evaporativa (Munro and Huang, 1997; Gómez-Plaza *et al.*, 2001) otorga mejores condiciones de humedad para el establecimiento de una cobertura vegetal.

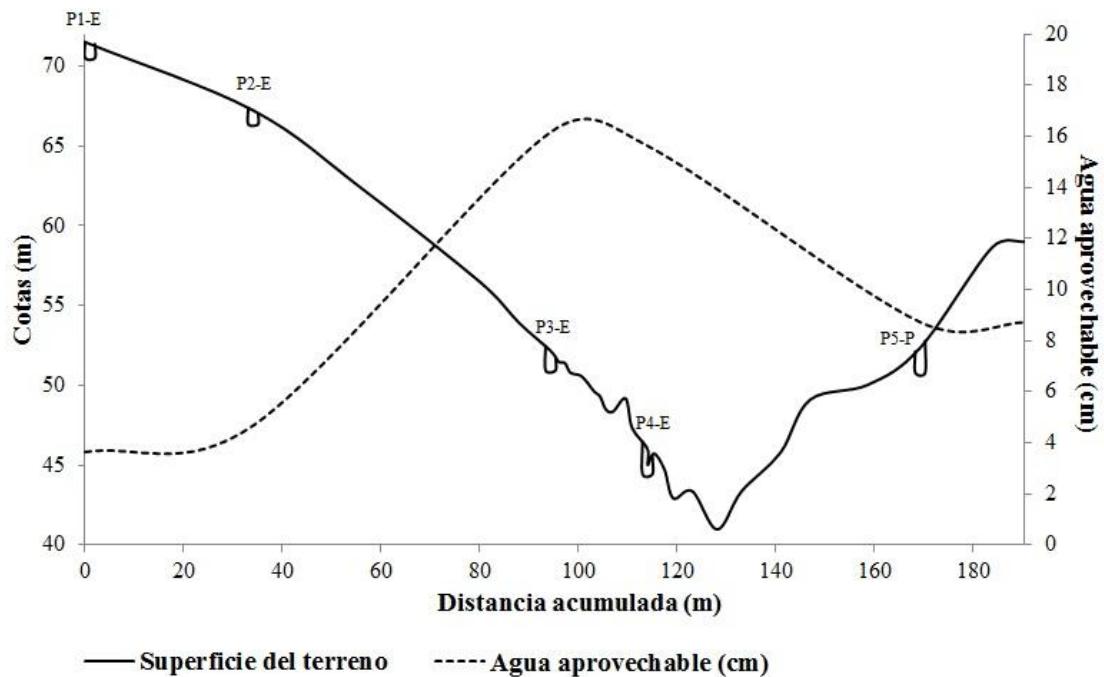


Figura 12. Variación del contenido de agua aprovechable a lo largo del transecto.

Propiedades químicas

Los resultados obtenidos de las propiedades químicas se incluyen en el Cuadro 5. De acuerdo a esta analítica, a la denominación preliminar de los horizontes evaluados se agrega el sufijo z, particularmente a los pedones ubicados en la ladera de exposición ecuatorial, dados los elevados niveles de conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe).

Cuadro 5. Propiedades químicas de los pedones (muestras tomadas en invierno de 2013).

Horiz.-Prof. (cm)	pH _w	CE _e	MO	CIC _{8,2}	Cationes solubles				Cationes extraíbles				Macronutrientes totales		
					Ca	K	Mg	Na	Ca	K	Mg	Na	N	K	P
					-----cmol _e L ⁻¹ -----				-----cmol _e kg ⁻¹ -----				-----%-----		
P1-E(A) ₀₋₁₈	7,51	1,65	1,89	12,34	3,26	0,08	2,35	6,77	3,92	0,26	2,23	1,53	0,10	0,34	0,27
P1-E(Bt) ₁₈₋₅₀	7,33	1,80	1,15	10,75	2,20	0,12	1,71	9,10	8,83	0,11	4,13	4,37	0,08	0,38	0,50
P1-E(Cz) ₅₀₋₁₀₀	7,12	5,87	0,08	16,37	1,40	0,01	0,64	0,49	4,64	0,21	4,27	6,10	0,03	0,37	1,54
P2-E(A) ₀₋₂₀	7,42	0,43	1,70	14,46	2,53	1,19	3,18	20,60	5,24	0,80	1,56	0,85	0,09	0,29	0,41
P2-E(Bt) ₂₀₋₄₀	7,58	0,94	0,99	11,67	1,40	0,06	0,41	6,81	12,23	0,15	4,10	4,91	0,08	0,22	0,60
P2-E(Bz) ₄₀₋₅₅	7,78	4,58	0,11	17,93	5,02	0,06	6,33	20,79	15,05	0,98	4,09	11,80	0,04	0,16	1,39
P2-E(Cz) ₅₅₋₁₀₀	7,14	5,79	0,11	20,94	4,23	0,05	4,44	21,39	11,49	0,00	3,49	9,51	0,03	0,11	1,25
P3-E(Az) ₀₋₅₀	7,12	8,87	0,52	18,49	6,65	0,41	8,43	29,15	9,75	0,20	10,53	7,34	0,02	0,09	0,43
P3-E(Bz) ₅₀₋₁₅₀	7,25	5,66	0,20	18,15	4,31	0,13	5,26	25,40	8,08	0,20	8,87	6,66	0,03	0,39	0,60
P4-E(Az) ₀₋₇₀	6,41	47,03	0,20	17,03	64,92	0,24	127,92	29,55	7,61	0,27	8,39	9,28	0,04	0,61	0,47
P4-E(Bz) ₇₀₋₁₈₀	6,43	28,07	0,10	14,46	22,85	0,27	41,74	14,00	4,52	0,36	5,30	5,80	0,04	0,61	0,47
P5-P(A) ₀₋₄₀	7,00	2,95	1,50	11,95	6,27	0,28	4,71	6,99	3,38	0,42	4,17	0,02	0,04	1,04	0,48
P5-P(C1) ₄₀₋₇₂	7,28	3,31	0,32	9,94	4,72	0,72	4,54	10,71	2,69	0,14	3,48	0,63	0,08	0,36	3,64
P5-P(C2) ₇₂₋₁₀₃	7,79	1,20	0,46	9,77	1,39	0,02	0,57	7,79	4,16	0,17	4,94	2,41	0,04	0,35	0,42
P5-P(C3) ₁₀₃₋₁₃₅	8,81	1,59	0,29	12,97	4,27	0,42	3,28	8,91	4,68	0,20	5,46	3,75	0,05	0,36	0,72

pH_w: pH en agua, CE_e: conductividad eléctrica del extracto de saturación, MO: materia orgánica, CIC_{8,2}: capacidad de intercambio de cationes a pH 8,2.

Los valores de pH en agua (pH_w) evaluados en los horizontes (Cuadro 5) varían de débilmente ácido (6,4) a débilmente alcalino (7,8) en la ladera de exposición ecuatorial y de neutro (7,0) a fuertemente alcalino (8,8) en la ladera opuesta, de acuerdo a Sadzawka (2006a). Se mantienen relativamente constantes en los primeros tres pedones analizados en la ladera de exposición ecuatorial, con rango de variación entre neutro a ligeramente alcalino; sin embargo, esta situación cambia en P4-E, correspondiente al pedón más bajo y erosionado de dicha ladera, adquiriendo condiciones ligeramente ácidas con pH cercano a 6,5 (Figura 13), acorde a lo encontrado en áreas similares severamente erosionadas (Yanda, 2000).

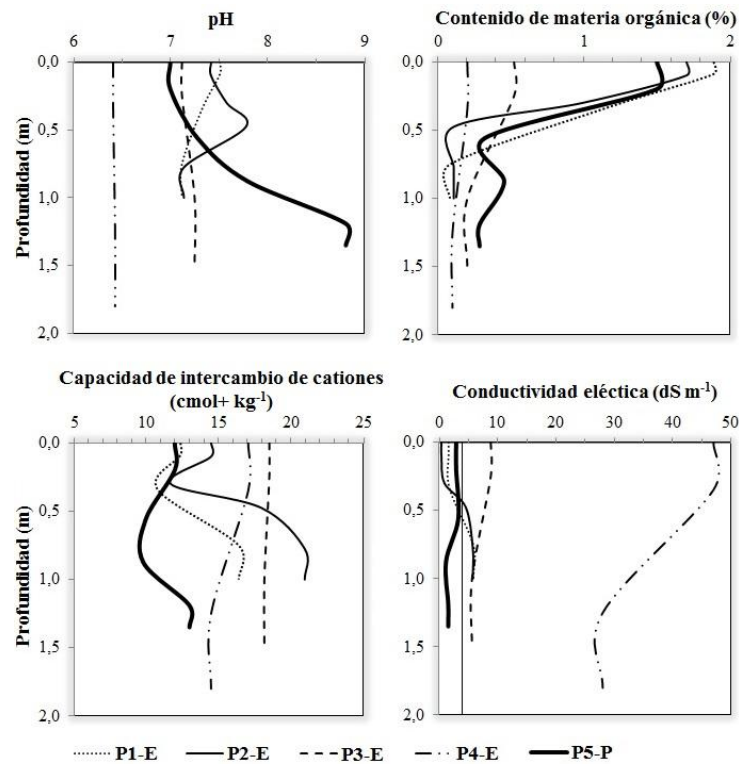


Figura 13. Propiedades químicas en profundidad de los pedones evaluados.

Al analizar la variación en profundidad, se aprecia que los valores de pHw de los perfiles ubicados en la zona de cárcavas son relativamente uniformes, mientras que el resto de los perfiles muestran variaciones en todos sus horizontes maestros. Comparando ambas laderas se aprecia que P5-P (con exposición polar) presenta un aumento considerable de alcalinidad en el horizonte C3, alcanzando valores de pH 8,8 (fuertemente alcalino), mientras que P2-E de la ladera opuesta presenta pH neutro en su horizonte más profundo.

Los contenidos de materia orgánica (MO) varían (Cuadro 5) de extremadamente bajos (0,08%) a moderados (1,89%) en los horizontes evaluados (Hazelton and Murphy, 2007). En general, en estas condiciones se esperan estos bajos contenidos de MO, como consecuencia de la escasa producción de biomasa vegetal, lo que incide en la capacidad de intercambio de cationes y en la erodabilidad del suelo.

Los mayores valores de MO se encontraron en los horizontes superficiales (Figura 13). Se observa que los perfiles ubicados en la zona de cárcavas (P3-E y P4-E) poseen los menores contenidos de MO en superficie (< 0,6%), mientras que el resto de los pedones de la misma ladera presentan valores superficiales cercanos a 1,9%, probablemente debido a los efectos del proceso erosivo en dicha ladera. Al realizar la comparación entre ambas laderas no se advierten diferencias relevantes en el contenido de MO; sin embargo, se aprecia que el perfil ubicado en la ladera de exposición ecuatorial presenta un 0,2% más de MO en superficie que el perfil opuesto, situación que se revierte en profundidad.

Los valores de capacidad de intercambio de cationes (CIC) obtenidos (Cuadro 5) varían entre valores bajos ($9,77 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$) y moderados ($18,49 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$), de acuerdo a Metson (1961). Tal como informan Khomo *et al.* (2011), se observa que los pedones ubicados en la zona de cárcavas más baja (P3-E y P4-E) presentan valores más uniformes (Figura 14) y mayores de CIC que los encontrados a cotas más altas (P1-E y P2-E). Esto puede atribuirse al mayor contenido de arcillas presente en la base de la ladera.

Al comparar los resultados de ambas laderas, se aprecia que la de exposición polar (en el pedón P5-P) posee valores inferiores al pedón P2-E de la ladera opuesta, con diferencias que se incrementan en profundidad.

La conductividad eléctrica (CEe) de los suelos (Cuadro 5) determina que se les clasifique de no salino ($0,43 \text{ dS m}^{-1}$) a muy fuertemente salino ($47,03 \text{ dS m}^{-1}$) de acuerdo a Sadzawka (2006b), observándose que a medida que se desciende en la ladera de exposición ecuatorial los valores aumentan (Figura 13), lo que permite inferir un movimiento lateral de sales hacia los pedones más bajos de la ladera. Los pedones P3-E y P4-E ubicados en la zona de cárcavas, superan los 4 dS m^{-1} en todos sus horizontes (suelo salino), mientras que en P1-E y P2-E este umbral se advierte a partir de los horizontes Cz y Bz, respectivamente.

Para corroborar los valores de CEe obtenidos en el perfil P4-E (notoriamente superiores al resto de los perfiles evaluados), se analizaron dos contramuestras, confirmando los tenores salinos encontrados. Los elevados valores de CEe obtenidos reafirman la hipótesis de una influencia del mar en la génesis de los suelos analizados, lo que permite inferir que se trataría de terrazas marinas (IREN, 1977) marginales. Estos elevados valores de CEe observados en la base de los pedones P1-E y P2-E, así como en la totalidad de los pedones P3-E y P4-E, sugieren la presencia de sales de alta solubilidad (Porta *et al.*, 2003).

Al comparar ambas laderas se aprecia que la de exposición ecuatorial presenta menor CEe en superficie que la opuesta, situación que se revierte a los 40 cm de profundidad. Este hecho obedecería a un descenso de sales por efecto de las lluvias en el pedón P2-E, debido a que las muestras fueron tomadas en invierno; mientras que en P5-P de la ladera opuesta, el ascenso de sales a los horizontes más superficiales podría estar asociado a la presencia de una cobertura vegetal más densa, con mayor demanda evapotranspirativa. En el pedón P2-E se observa una condición no salina en los horizontes A y Bt, tornándose moderadamente salina en los horizontes Bz y Cz, mientras que en el perfil P5-P de la ladera contraria, los primeros dos horizontes (A y C1) presentan condiciones ligeramente salinas, cambiando a no salino en los horizontes C2 y C3 de mayor profundidad.

De acuerdo a Sierra (2003), los valores de nitrógeno total (N) varían de muy bajo (0,02%) a bajo (0,1%), mientras que los valores de fósforo y potasio totales (P y K) son muy altos en todos los pedones. Estos elevados valores de P, aparte su escasa movilidad, permiten asociarlos a niveles encontrados en posición de terrazas marinas (Huggett, 1998), dando cuenta de la influencia del mar en los suelos analizados (IREN, 1977). Además, es posible encontrar elevados niveles de P y K en terrazas marinas habitadas por aves en zonas denominadas covaderas, donde se han logrado realizar estimaciones de hasta 20% de P y

2,5% de K en el guano rojo (Freres, 2004), lo que permitiría suponer que el terreno pudo haber sido utilizado en el pasado como hábitat de aves marinas.

En la Figura 14 se observa que los perfiles descritos en la zona de las cárcavas (P3-E y P4-E) no presentan grandes variaciones en el contenido de estos macronutrientes totales en sus horizontes maestros, mientras que en P1-E y P2-E de la misma ladera, se produce un aumento en los niveles de P a partir del segundo horizonte genético (Bt). Un cambio mayor se aprecia en el contenido de P total del horizonte C1 del perfil P5-P, aunque decrece abruptamente en profundidad. Al comparar los perfiles de ambas laderas se observa que en la de exposición polar se encuentran mayores niveles de K en superficie que el perfil P2-E de la ladera contraria. En general, los contenidos de N total son bajos en todos los sitios y profundidades.

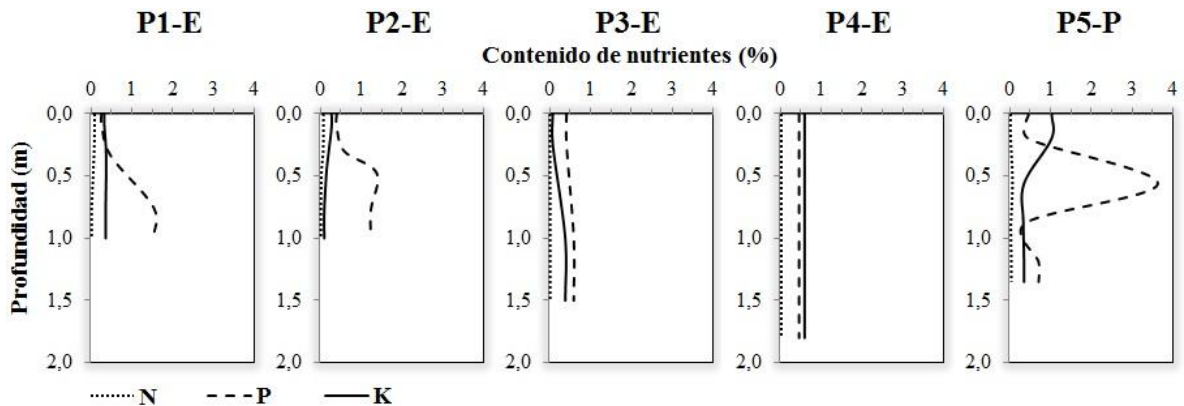


Figura 14. Contenido de macronutrientes totales evaluados en profundidad dentro de cada perfil.

Los valores de cationes solubles (Cuadro 5) muestran una tendencia a aumentar a medida que se desciende en la ladera de exposición ecuatorial (Figura 15), lo que indicaría un descenso en solución a lo largo de ésta. Se observa que la mayor diferencia se produce en los contenidos de Mg, con una variación aproximada de $125 \text{ mmol}_+ \text{ L}^{-1}$ entre el perfil P1-E y el P4-E de cota más baja. Los valores de Ca muestran un incremento de $61 \text{ mmol}_+ \text{ L}^{-1}$ entre el punto más alto y el más bajo, mientras que Na y K aumentaron 22 y $0,16 \text{ mmol}_+ \text{ L}^{-1}$ respectivamente.

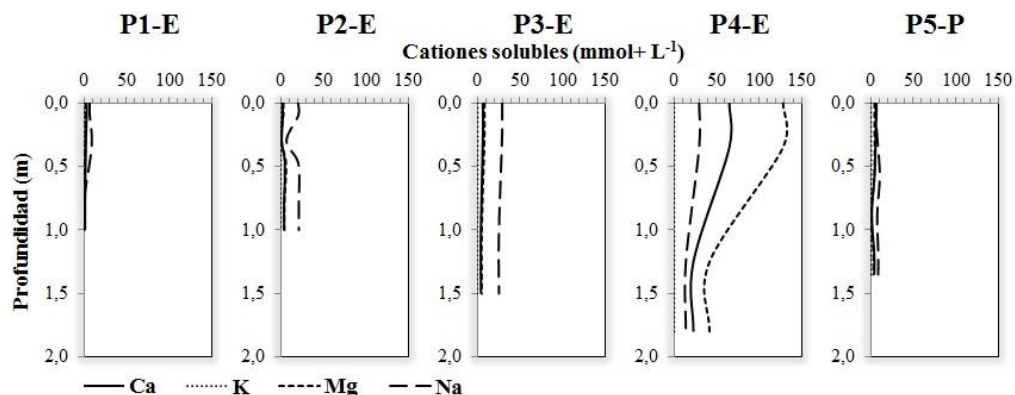


Figura 15. Contenido de cationes solubles en los perfiles evaluados.

Al realizar la comparación entre laderas, se aprecia que P5-P tiene mayor contenido de Ca soluble en relación a P2-E (Cuadro 5), notándose además un menor contenido de Na en la ladera de exposición polar.

Los valores de cationes extraíbles indican una tendencia similar a los cationes solubles, observándose un aumento a menor cota dentro de la ladera erosionada (Figura 16). Los niveles de Ca en superficie varían de bajos a medios entre el pedón P1-E y el P4-E, mientras que a 1 m de profundidad se encuentran valores bajos en ambos perfiles (Metson, 1961). El K no presenta variaciones relevantes a diferentes cotas en la ladera, manteniendo niveles muy bajos a moderados en todos los pedones evaluados, con excepción de los horizontes A y Bz de P2-E, en los cuales se encuentran niveles altos. Los contenidos de Mg se mantienen moderados a altos en los primeros dos pedones y muy altos en los pedones ubicados en la cárcava, mientras que el Na varía de contenidos altos a muy altos desde la cima al perfil más bajo.

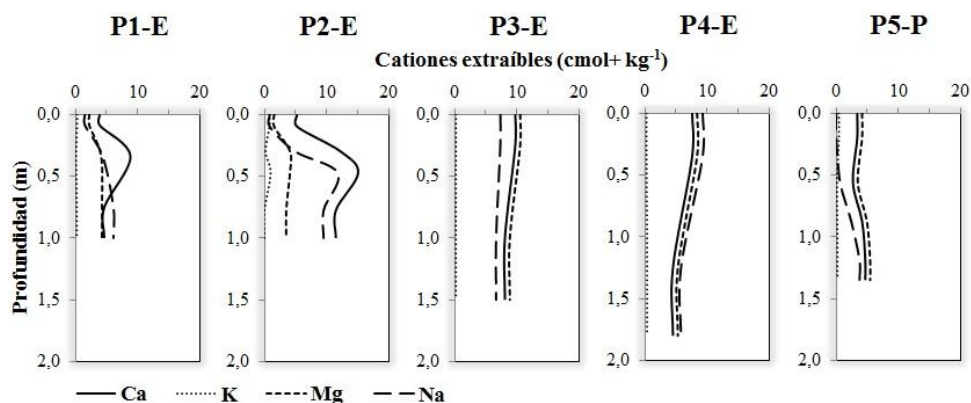


Figura 16. Contenido de cationes extraíbles en los perfiles evaluados.

La ladera de exposición ecuatorial presenta mayores contenidos de cationes extraíbles en superficie en comparación con la ladera opuesta, a excepción del Mg, que se encuentra en niveles moderados en P2-E mientras que en el pedón P5-P los niveles superficiales son altos. A una profundidad de 1 m se aprecia que los mayores niveles de Ca y Na se

presentan en la ladera de exposición ecuatorial, mientras que el Mg y K no varían considerablemente entre laderas, encontrándose valores de K muy bajos y de Mg altos en ambos casos.

Los criterios de sodicidad (RAS y PSI, Cuadro 6) indican que los suelos no son sódicos ($RAS \leq 13$ y $PSI \leq 15\%$), con excepción del horizonte superficial en P2-E, que presenta 15,02% de PSI. Al comparar P2-E y P5-P entre laderas, se aprecian valores inferiores en la RAS y PSI en la ladera de exposición polar.

Cuadro 6. Parámetros de sodicidad (relación de adsorción de sodio, RAS; porcentaje de sodio intercambiable, PSI) y saturación básica (SB) para los horizontes evaluados.

Horiz. _{prof. (cm)}	RAS	PSI	SB
		(%)	
P1-E(A) ₀₋₁₈	4,05	5,54	64,34
P1-E(Bt) ₁₈₋₅₀	6,51	8,63	100,00
P1-E(Cz) ₅₀₋₁₀₀	0,48	0,69	92,97
P2-E(A) ₀₋₂₀	12,19	15,02	58,44
P2-E(Bt) ₂₀₋₄₀	7,16	9,41	100,00
P2-E(Bz) ₄₀₋₅₅	8,73	11,23	100,00
P2-E(Cz) ₅₅₋₁₀₀	10,27	12,96	100,00
P3-E(Az) ₀₋₅₀	10,62	13,34	100,00
P3-E(Bz) ₅₀₋₁₅₀	11,61	14,41	100,00
P4-E(Az) ₀₋₇₀	3,01	4,18	100,00
P4-E(Bz) ₇₀₋₁₈₀	2,46	3,45	100,00
P5-P(A) ₀₋₄₀	2,98	4,14	66,86
P5-P(C1) ₄₀₋₇₂	4,98	6,73	69,82
P5-P(C2) ₇₂₋₁₀₃	7,86	10,24	100,00
P5-P(C3) ₁₀₃₋₁₃₅	4,59	6,23	100,00

$PSI = 1,45 * RAS / (1 + 0,0145 * RAS)$ (Sadzawka *et al.*, 2006).

Los valores obtenidos de saturación básica (SB) son en general muy altos, correspondiente a suelos muy débilmente lixiviados (Metson, 1961), encontrándose los valores más bajos en los horizontes superficiales de los pedones P1-E y P2-E, lo que puede deberse a una textura más gruesa en superficie en dichos perfiles que permite el movimiento de bases hacia los horizontes más profundos.

Al comparar ambas laderas se aprecia que la de exposición ecuatorial presenta menor SB en superficie que la ladera opuesta, lo que puede asociarse a la textura más gruesa del horizonte A de P2-E; sin embargo, en la ladera de exposición polar los valores se mantienen en rangos menores hasta los 70 cm de profundidad, asociándose a mayores contenidos de agua en relación a P2-E.

Reconstitución de perfiles

El transecto desarrollado desde la cima a la base de la ladera se ajusta a la definición de catena propuesta por Milne (1936), indicando un origen común (material parental) de los suelos analizados. Considerando que el clima, material parental, edad y biota son similares en todos los puntos evaluados, se puede asumir que en algún tiempo remoto los pedones del lugar eran muy semejantes, variando sólo por efecto de la posición dentro del paisaje.

Aunque el relieve por sí mismo es un factor pasivo de formación de suelos, provee energía cinética y potencial al suelo, a través de su impacto en los flujos de materia y energía dentro del sistema suelo-paisaje (Schaetzl, 2013). Es por este motivo que la variación en los suelos analizados puede estar influenciada por transferencias de materiales sólidos, fluidos y gases que se mueven a través y entre los pedones conectados en la ladera, haciendo del conjunto una conexión en cadena. De este modo los suelos cambian regularmente y cada pedón está genéticamente conectado al circundante, siendo afectados por su posición dentro de la pendiente y por procesos que ocurren sobre y bajo la superficie del suelo. En general, se espera que en la ladera se presente un desprendimiento de partículas en la cima, transporte a lo largo de la pendiente y depositación en la base (De Alba *et al.*, 2004), dominando la meteorización de tipo química en la parte más alta frente a la erosión y la meteorización física (King, 1957).

La meteorización es el principal proceso de formación de suelos y cambia con las variaciones ambientales, siendo controlada principalmente por el clima, la biota y la geología del lugar (Viles, 2013). Las tasas en que ocurre este proceso decaen con el tiempo debido a la formación de los productos de meteorización (Colman, 1981; Dietrich *et al.*, 1995). Se observa que en la base de la ladera erosionada se produce una reducción del tamaño de partículas que puede asociarse a un mayor grado de meteorización, lo que implicará que la conductividad hidráulica y la capacidad de infiltración de agua disminuyan (Lohse and Dietrich, 2005), generando mayores niveles de flujo superficial. Como el movimiento de agua y sedimentos en los suelos de las cimas tiende a ser mínimo, los suelos no varían considerablemente entre ellos (Schaetzl, 2013); por el contrario, en los suelos de los hombros de la ladera los procesos dominantes son la escorrentía y la erosión (Pennock, 2003). En estas zonas más escarpadas de la ladera se esperaría que la formación de costras se reduzca por el bajo impacto de la energía cinética de las gotas de lluvia y por el desprendimiento continuo de partículas (Poesen *et al.*, 2003), provocando que las partículas más finas tiendan a depositarse pendiente abajo.

Los procesos de superficie en laderas semiáridas pueden ser muy importantes en eventos de lluvia extremos, causando importantes tasas de erosión con una alta producción de sedimentos, debido a la presencia de zonas desnudas entre otras áreas cubiertas con vegetación (Cammeraat, 2013). Al analizar los pedones descritos en el transecto, se puede apreciar ciertas similitudes. Los horizontes Bt de P1-E y P2-E y los horizontes Az de los pedones P3-E y P4-E presentan texturas más finas que el general de los suelos evaluados en terreno, además de presentar prismas gruesos. Esto permite presumir que se trataría de un

único horizonte que se extiende a lo largo de la ladera de exposición ecuatorial. El hecho que en los pedones P1-E y P2-E este horizonte se encuentre subsuperficialmente mientras que en los pedones de la zona de cárcava se presente en superficie, puede deberse a un truncamiento del perfil del suelo producto de la pérdida del horizonte A por efecto de la erosión (De Alba *et al.*, 2004). Olson (1997) determinó que el subsuelo expuesto por remoción del horizonte A fue notoriamente más bajo en MO y más alto en contenido de arcillas que el suelo superficial, concordando con los resultados obtenidos en el presente estudio. A su vez, Harris *et al.* (2008) demostraron que un elevado contenido de arcillas influye en reducir las distancias de desplazamiento de partículas en superficie, generando iluviación en el pedón. En los suelos estudiados predominan en general las partículas de tamaño arena, por lo que se esperaría que se produzca un desplazamiento considerable de partículas aguas abajo, lo que corrobora la idea de la pérdida del horizonte A por erosión.

Otra similitud se presenta entre los horizontes Bz de P2-E y de los pedones descritos en la cárcava. En ellos se aprecian colores relativamente más claros que los horizontes inmediatamente superiores, junto a una estructura de tipo prismática. Según estos antecedentes, se puede inferir que el desarrollo del suelo en la ladera de exposición ecuatorial (erosionada) está determinado por una secuencia A-Bt-Cz en la cima (Figura 17), seguida de la aparición de un horizonte Bz de color distinto al Bt original a aproximadamente a 15 m de distancia horizontal. Luego se observa la pérdida del horizonte A original, siendo reemplazado por el horizonte Bt característico del pedón P2-E, el cual según definición, al encontrarse en superficie pasa a denominarse A (Schoeneberger *et al.*, 2012).

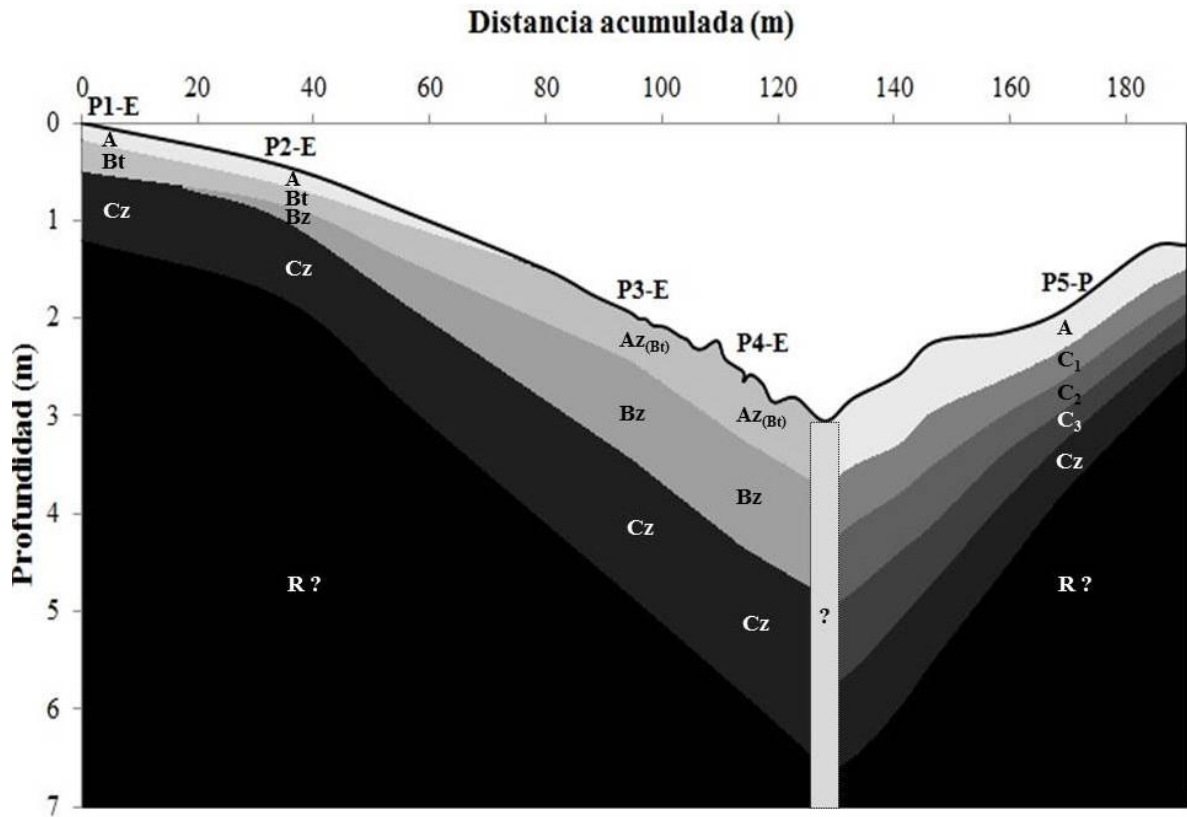


Figura 17. Variación de horizontes en el transecto analizado. ($Az_{(Bt)}$): Horizonte descrito como Az con características propias de horizonte Bt). Se asume la presencia de R y la profundidad de Cz. La escala vertical ha sido exagerada para enfatizar la profundidad del suelo.

Si bien el volumen de suelo estimado como pérdida producto de la formación de cárcavas fue de 142 m^3 (Apéndice II), al realizar la reconstitución de perfiles en la ladera de exposición ecuatorial se evidencia una pérdida total del horizonte A original en la base de la ladera. A pesar de que este volumen debería ser considerado al momento de evaluar la cantidad de suelo total perdido por la erosión, existe cierta incerteza al estimarlo con exactitud debido a que se desconoce el espesor que tuvo el horizonte A en los pedones más bajos de la ladera (P3-E y P4-E). En consecuencia, deben separarse los conceptos de perfiles truncados generados quizás por una erosión de tipo geológico, de las pérdidas de un volumen de suelo perdido (cárcava) producto de una erosión acelerada o inducida por el hombre.

En el transecto se asume que a medida que se desciende en la ladera, la producción de suelo mediante meteorización se ve incrementada (Furbish and Fagherazzi, 2001) como se aprecia en la Figura 17, aumentando la profundidad de la interfaz suelo-material parental. En general para zonas áridas, en los suelos más húmedos de exposición polar se produce meteorización química a tasas mayores, reduciendo el riesgo de generar cárcavas (Burnett *et al.*, 2008). Es por este motivo que los rasgos erosivos presentes en el lugar sólo se evidencian en la ladera de exposición ecuatorial, la cual posee mayor evapotranspiración,

provocando una disminución del contenido de agua y una reducción de la tasa de meteorización.

En ambientes áridos y semiáridos las cárcavas se relacionan con tierras de baja calidad para la agricultura (Charlton, 2008), y su desarrollo es controlado por procesos en superficie y subsuperficiales, manteniendo su posición como canales permanentes (Gao, 2013). En la zona de cárcavas, aunque exista depositación de sedimentos, la erosión es más intensa, ampliando las cárcavas en ancho y longitud, dominando el flujo hacia la base de la ladera, formando parte de la red de drenaje (Poesen *et al.*, 2002; Morgan, 2005).

La formación de cárcavas por conductos subsuperficiales está influenciada por condiciones climáticas, hidráulicas y características del suelo. Se debe generar una diferencia de permeabilidad entre las capas del suelo para que esto se produzca. Los altos gradientes hidráulicos necesarios para el desarrollo de conductos subsuperficiales se alcanzan comúnmente por la apertura de grietas profundas pendiente arriba (Bull and Kirkby, 2002). En general, la cabecera de las cárcavas y los lados están sujetas a tres fuerzas: la resistencia del suelo, la fuerza del agua que infiltra y la fuerza del agua que percola. Cuando las fuerzas que inciden en el desarrollo de cárcavas son superiores a la resistencia del suelo, la cabecera y lados de la cárcava colapsan, incrementando su volumen (Gao, 2013).

Si bien se acepta la idea de pérdida de suelo por efecto del transporte de partículas en superficie (evidenciado en la presencia de perfiles truncados), no se puede descartar la formación de conductos subsuperficiales que incidan en la formación de cárcavas en la ladera de exposición ecuatorial. Si se considera que bajo el horizonte Bz de los perfiles P3-E y P4-E se encuentra un horizonte Cz de textura considerablemente más gruesa; la diferente permeabilidad de ambos horizontes podría generar un gradiente hidráulico que promueva la formación de cárcavas mediante la formación de conductos subsuperficiales y posterior colapso del suelo.

Para evaluar los alcances de la formación de cárcavas (erosión acelerada) en el lugar de estudio, se calculó la pérdida de partículas finas (< 2 mm), materia orgánica y macronutrientes totales, considerando dos condiciones: el transecto sin la presencia de cárcava y el transecto en la condición actual. Se determinó un volumen de suelo (V_{horiz}) de forma cúbica (sin presencia de cárcava) en cada perfil evaluado, definiendo un valor unitario de longitud (L : 1,00 m) y un ancho estándar (W : 4,78 m) para cada horizonte. Este último corresponde al ancho superior mayor medido en la zona de cárcavas. El valor de profundidad (d) corresponde al espesor de cada horizonte en particular.

$$V_{horiz} = L \cdot W \cdot d \quad (4)$$

Así, el volumen total de cada pedón corresponde a la suma de los volúmenes parciales de sus horizontes (Figura 18).

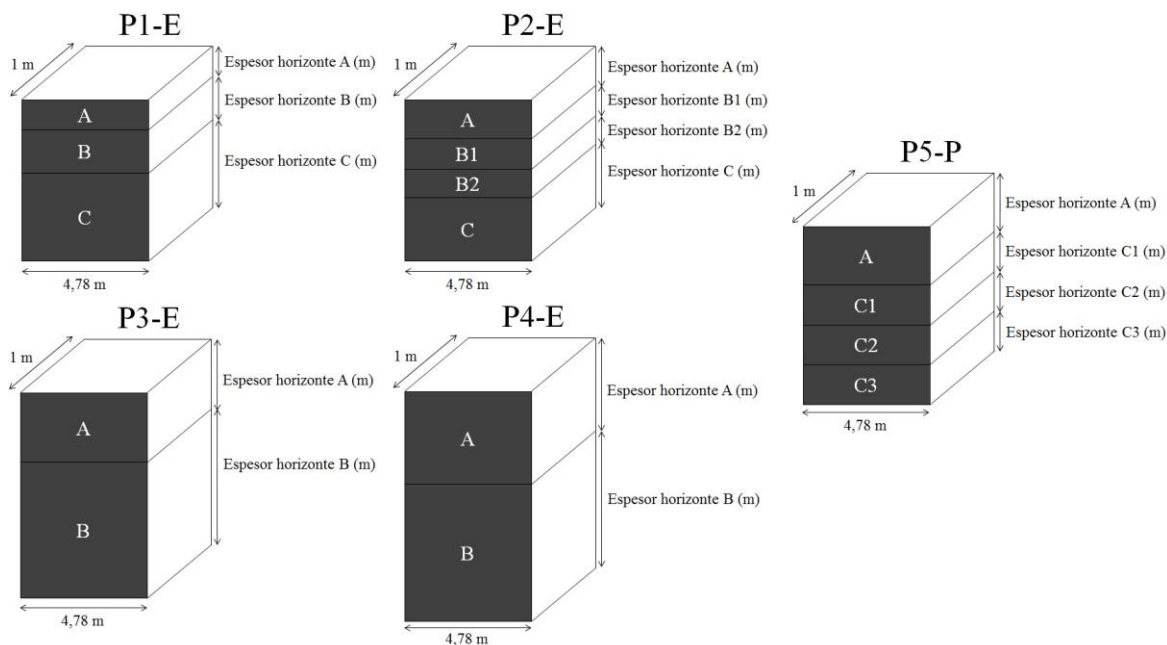


Figura 18. Variables consideradas en el cálculo del volumen de suelo.

Posteriormente se determinó la masa de suelo seco (en Mg) para cada pedón evaluado, empleando la densidad aparente obtenida con el método del cilindro en cada horizonte. Una vez conocido este valor se determinaron los contenidos de materiales (en Mg), basado en los valores obtenidos en los análisis de laboratorio. Para identificar el alcance de la erosión en la pérdida de materiales, se descontó del volumen estimado en P3-E y P4-E el espacio ocupado por el canal de la cárcava, estimándose nuevamente para estos pedones dichos contenidos, según el procedimiento ya descrito. Una vez obtenidos los valores con y sin la influencia de la cárcava, se determinó la diferencia entre ellos como pérdida de materiales (para cada perfil), para posteriormente estimar el promedio de pérdida entre P3-E y P4-E, valor que luego fue ponderado por una distancia inclinada de 42,2 m (longitud total de la cárcava evaluada), y así obtener el monto total perdido por erosión.

Las pérdidas estimadas por efecto de la erosión por cárcavas en la ladera de exposición ecuatorial alcanzan a: 5.237 Mg ha⁻¹ de arena, 1.293 Mg ha⁻¹ de limo, 2.458 Mg ha⁻¹ de arcilla, 19 Mg ha⁻¹ de MO, 3 Mg ha⁻¹ de N, 45 Mg ha⁻¹ de P y 44 Mg ha⁻¹ de K. Todo ello indudablemente contribuye a reducir la fertilidad del suelo, su resiliencia y al deterioro en general del medio edáfico, promoviendo un mayor desarrollo de cárcavas producto de una menor estabilidad. En la Figura 19 es posible identificar la variación en el contenido de materiales en el transecto evaluado como consecuencia de la formación de la cárcava.

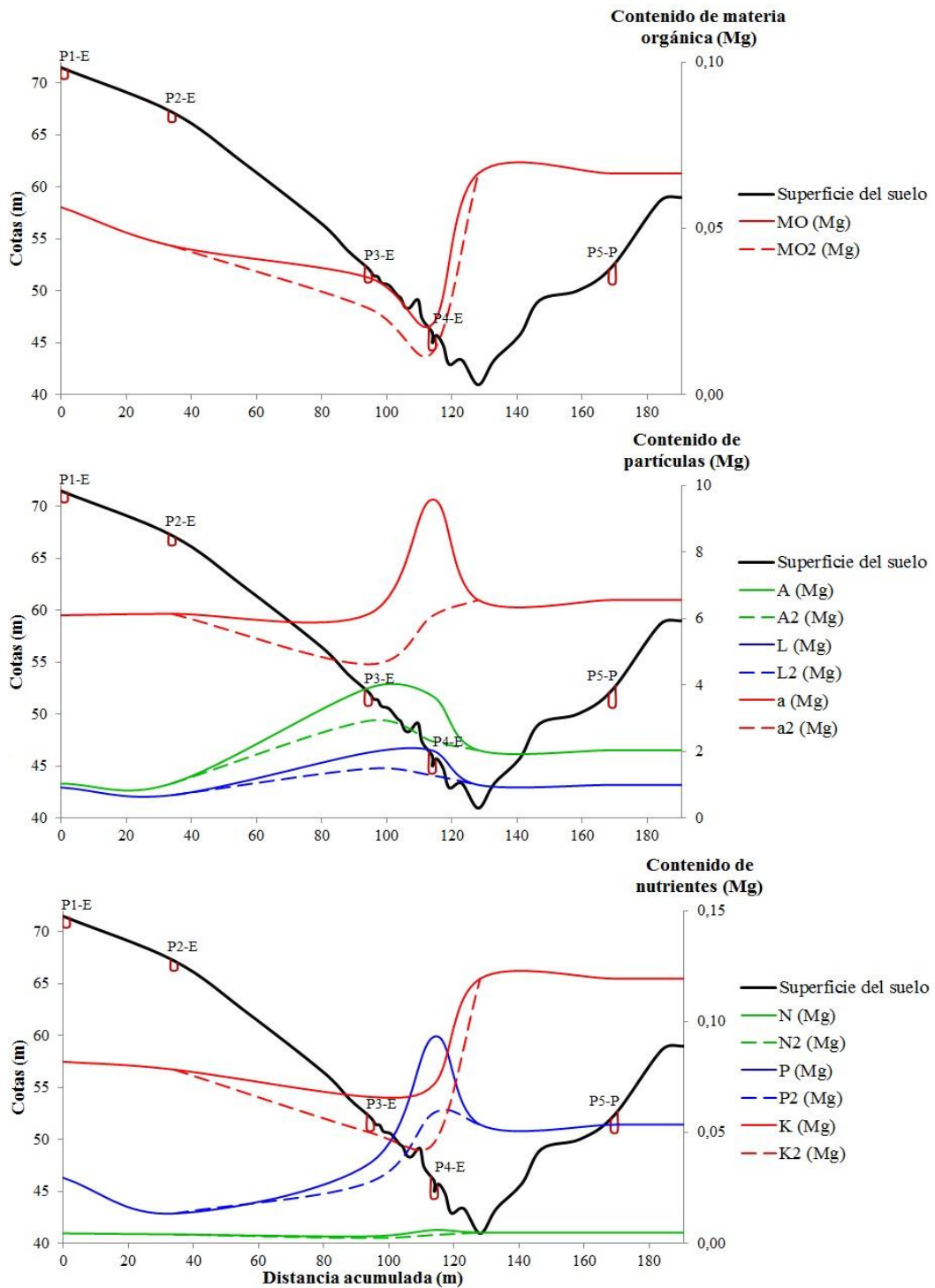


Figura 19. Pérdida de materiales como consecuencia de la formación de cárcava. Superior: contenido de materia orgánica sin cárcava (MO) y con cárcava (MO2). Medio: partículas finas (< 2 mm) sin cárcava (a, L, A) y con cárcava (a2, L2, A2). Inferior: macronutrientes totales sin cárcava (N, P, K) y con cárcava (N2, P2, K2).

Considerando un valor de 58% de carbono orgánico (CO) en la materia orgánica (Sadzawka *et al.*, 2006), la pérdida de CO por la formación de la cárcava equivale a 216,34 kg, correspondiente a una pérdida de 10,7 Mg ha⁻¹. A nivel mundial históricamente la pérdida de CO en suelos en pendiente fluctúa entre 30 y 40 Mg ha⁻¹, o de la mitad a dos tercios de sus contenidos originales (Lal, 2004); sin embargo, en la condición estudiada estos valores van de 51 a 77% de la condición original. Esto indica que las medidas preventivas contra la degradación de suelos resultan imperativas, dada la magnitud de las pérdidas involucradas.

Si bien existen hipótesis que la erosión de suelos puede promover la secuestración de C, basada en que vastas cantidades de sedimentos y C eventualmente no alcanzan los sistemas fluviales y están siendo depositados *ex situ* como sumideros (Chaplot *et al.*, 2005; Van Oost *et al.*, 2005; Yoo *et al.*, 2005), no es menos cierto que en laderas como la estudiada estos materiales ya no están y se hace prácticamente imposible revertir su condición de degradación. Por otra parte, diversos estudios relacionan la erosión con un incremento de los niveles de CO₂ atmosféricos (Jacinthe *et al.*, 2002; Chaplot *et al.*, 2012), llegando a emisiones de 0,8 a 1,2 Pg de C al año inducidas por este proceso (Lal, 2003). Es por esto que la implementación de medidas curativas contra la degradación de los suelos es de vital importancia, si se considera que la restauración de tierras degradadas puede aumentar el contenido medio de C en 1,5 Mg ha⁻¹ en suelos y vegetación (FAO, 2004).

La pérdida de materiales no es la única consecuencia de la erosión en la ladera. Al respecto, Mudd *et al.* (2013) señalan que por efecto del transporte mecánico de partículas mediante la acción del agua, laderas que presentan grandes niveles de desprendimiento y transporte tienden a reducir su gradiente de pendiente y aumentar la tasa de meteorización. Esta reducción en el gradiente de pendiente puede incidir en un aumento del flujo de agua en superficie, debido a que al estar menos inclinado, el impacto que las gotas de lluvia generará en el suelo será mayor, provocando pérdida de estructura y reduciendo la capacidad de infiltración del suelo.

Con relación a la formación de cárcavas en la base de laderas, Furbish and Fagherazzi (2001) señalan que una incisión acelerada como esta generará laderas más escarpadas en la base de éstas, promoviendo la erosión en las cercanías del canal, lo que reduciría el espesor del suelo. Esto provocaría un aumento en la producción de suelo debido a la exposición de minerales inalterados al ambiente externo (Mudd and Furbish, 2006), generándose partículas gruesas que reemplazarían a las finas que fueron removidas. Lo empinado del terreno y los altos contenidos de partículas gruesas, aumentarían la conductividad hidráulica cerca del canal, incrementando la tasa de meteorización química (Maher, 2010), lo que acrecentaría las pérdidas de partículas en la base de la ladera afectada.

CONCLUSIONES

El análisis realizado a la cárcava incluida en el transecto da cuenta de un canal en forma de V, provocado por horizontes más resistentes a mayor profundidad. Según este análisis, el volumen de suelo removido producto de la formación de cárcavas es de 142 m^3 , asociándose directamente no sólo a una pérdida de partículas de suelo, sino también a una completa desaparición de materia orgánica y macronutrientes.

A medida que se desciende en la ladera erosionada (exposición ecuatorial) se perciben perfiles de suelo más profundos caracterizados por texturas más finas que en la parte más alta, los cuales presentan mayor resistencia física al desarrollo de raíces. En la parte más baja del transecto se identifican suelos muy fuertemente salinos, lo que permite inferir que se trataría de terrazas marinas en las que el flujo de agua conduce a una acumulación de sales en los pedones más bajos y dificulta el desarrollo de una cobertura vegetal.

Al comparar el efecto del aspecto de pendiente, se puede establecer que las laderas de exposición polar tienden a presentar mayores niveles de agua en relación a las de exposición ecuatorial, promoviendo un mayor grado de meteorización que incide en aumentos de los contenidos de arcilla y en una disminución del riesgo de formación de cárcavas basales. Además, al tener más agua aprovechable, se favorece el crecimiento de vegetación que aporta MO constantemente a los pedones, reduciendo las restricciones físicas y promoviendo una mayor estabilidad de sus horizontes.

La formación de cárcavas en la base de laderas de la Región de Coquimbo se asocia a procesos erosivos acelerados por malas prácticas agrícolas. Como consecuencia de estos procesos, es posible encontrar perfiles truncados a lo largo de la ladera, evidenciándose horizontes superficiales menos resistentes en las partes altas y con mayor resistencia en la base de éstas. Los resultados de la reconstitución de perfiles de suelo indican que el pedón más completo en la ladera erosionada (perfil de referencia) tiene una secuencia de horizontes A-Bt-Bz-Cz. En la condición actual y producto del proceso erosivo, la ladera de exposición ecuatorial presenta una secuencia A-Bt-Cz en la cima, seguida de la aparición del horizonte Bz a aproximadamente a 15 m de distancia horizontal. Luego se observa la pérdida del horizonte A original, siendo reemplazado por el horizonte Bt, el cual según definición, al encontrarse en superficie pasa a denominarse A.

Las pérdidas estimadas por efecto de la erosión por cárcavas en la ladera de exposición ecuatorial alcanzan a: 5.237 Mg ha^{-1} de arena, 1.293 Mg ha^{-1} de limo, 2.458 Mg ha^{-1} de arcilla, 19 Mg ha^{-1} de MO, 3 Mg ha^{-1} de N, 45 Mg ha^{-1} de P y 44 Mg ha^{-1} de K. Esta situación de degradación afectaría la resiliencia y fertilidad de los suelos analizados, promoviendo la disminución de la estabilidad de sus horizontes y un aumento del volumen de cárcavas, motivo por el cual el establecimiento de medidas preventivas contra la degradación de los suelos resulta imperativo dada la magnitud de las pérdidas involucradas.

BIBLIOGRAFÍA

- Albanesi, A.; A. Anriquez y A.P. Sánchez. 2003. Efectos de la agricultura convencional sobre algunas formas del C en una toposecuencia de la Región Chaqueña, Argentina. *Agriscientia* 20: 9-17.
- Badía, D.; C. Martí; J.M. Aznar and J. León. 2013, feb. Influence of slope and parent rock on soil genesis and classification in semiarid mountainous environments. *Geoderma* 193-194: 13-21.
- Belyaev, V.; P. Wallbrink; V. Golosov; A. Murray and A. Sidorchuk. 2004, mar. Reconstructing the development of a gully in the upper Kalaus basin, Stavropol Region (Southern Russia). *Earth Surface Processes and Landforms* 29(3): 323-341.
- Brunel, N. y O. Seguel. 2011. Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro Sur* 39(1): 1-12.
- Brunner, A.; S. Park; G. Ruecker; R. Dikau and P. Vlek. 2004, sep. Catenary soil development influencing erosion susceptibility along a hillslope in Uganda. *Catena* 58(1): 1-22.
- Bull, L.J. and M.J. Kirkby. 2002. Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels. London, England: Wiley. 229 p.
- Burnett, B.N.; G.A. Meyer and L.D. McFadden. 2008, sep. Aspect-related microclimatic influences on slope forms and processes, northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research* 113: F03002.
- Cammeraat, E.L.H., 2013. Semiarid hillslope processes. (Ch. 7. pp: 355-362). In: *Shroder, J.; R.A Marston. and M. Stoffel. Treatise on Geomorphology. Vol. 7. Mountain and hillslope geomorphology. San Diego, CA, USA: Academic Press. 388 p.*
- Casanova, M.; I. Messing and A. Joel. 2000, jan. Influence of aspect and slope gradient on hydraulic conductivity measured by tension infiltrometer. *Hydrological Processes* 14(1): 155-164.
- Casanova, M.; C. Leiva; O. Seguel; O. Salazar y W. Luzio. 2006. Degradación de suelos y desertificación. (cap. 10, pp. 353-383). En: *Luzio, W. y M. Casanova (ed.). Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 393 p.*
- Casanova, M.; G. Dercon y F. Zapata. 2010, jan. Evaluación de la erosión de suelo: métodos tradicionales (pp: 444-459). En: Congreso de la Organización Internacional de Conservación de Suelo (16°, 8 al 12 de noviembre de 2010, Santiago, Chile). Proceeding

contribution in extenso. Eds. Casanova, M; G. Ruiz y E. Zagal. Santiago, Chile: SCHCS, SAG, Universidad Mayor, Universidad de Concepción. 530 p.

Cerdà, A. 1997, nov. Seasonal changes of the infiltration rates in a Mediterranean scrubland on limestone. *Journal of Hydrology* 198(1-4): 209-225.

Cerisola, C; M. García y R. Filgueira. 2005, dic. Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 23(2): 167-178.

Chamberlain, J. 1990. Understanding soil erosion and its control. (Tech. Rep. N° 72), Volunteers and Technical Assistance (VITA). Arlington, VA, U.S.A: VITA. 12 p.

Chaplot, V.; C. Rumpel and C. Valentin. 2005, oct. Water erosion impact on soil and carbon redistributions within uplands of Mekong River. *Global Biogeochemical Cycles* 9(4): GB4004.

Chaplot, V.; C.N. Mchunu; A. Manson; S. Lorentz and G. Jewitt. 2012, sep. Water erosion-induced CO₂ emissions from tilled and no-tilled soils and sediments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 159: 62-69.

Charlton, R. 2008. Fundamentals of fluvial geomorphology. New York, USA: Routledge. 234 p.

Churchill, R.R. 1982. Aspect-induced differences in hillslope processes. *Earth Surface Processes and Landforms* 7: 171-182.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1990. Atlas agroclimático de Chile: Regiones IV a IX. Publicación n° 87. Santiago, Chile: CIREN. Esc. 1:1.300.000. 67 p. Blanco y negro.

CNR (Comisión Nacional de Riego). 1993. Estudio de suelos del valle del río Choapa y sus tributarios: atlas de estudio. Santiago, Chile: CNR, Ingeniería Agrícola Ltda. Esc: 1:20.000. 209 p. Blanco y negro.

Colman, S.M. 1981, may. Rock-weathering rates as functions of time. *Quaternary Research* 15(3): 250-264.

De Alba, S.; M. Lindstrom; T. Schumacher and D. Malo. 2004, sep. Soil landscape evolution due to soil redistribution by tillage: a new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes. *Catena* 58(1): 77-100.

Dietrich, W.E.; R. Reiss; M.L. Hsu and D.R. Montgomery. 1995. A process based-model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes* 9: 383-400.

Evans, R. 1998, jun. The erosional impacts of grazing animals. *Progress in Physical Geography* 22(2): 251-268.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2004. Carbon sequestration in dryland soils. Rome, Italy: FAO. 108 p. (World Soil Resources Report 102).

Fariás, E.; O. Seguel; M. Casanova; W. Luzio; I. Pino; X. Videla; A.M. Parada y A. Nario. 2007. Cambio en las propiedades físicas de un Ultic Haploxeralf cultivado con vid (*Vitis vinifera*). XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Guanajuato, México.

Flores, J.; M. Espinosa; E. Martínez; G. Henríquez; P. Avendaño; P. Torres *et al.* 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile: informe final. Santiago, Chile: CIREN. 285 p.

Frankl, A.; J. Poesen; J. Deckers; M. Haile and J. Nyssen. 2012, nov. Gully head retreat rates in the semi-arid highlands of Northern Ethiopia. *Geomorphology* 173-174(1): 185–195.

Frankl, A.; J. Poesen; N. Scholiers; M. Jacob; M. Haile; J. Deckers *et al.* 2013, nov. Factors controlling the morphology and volume (v) – length (l) relations of permanent gullies in the northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(14): 1672-1684.

Freres, R. 2004, sep. Guano de covaderas. (Bol. Div. N°6), Departamento de Protección de los Recursos Naturales Renovables, Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Chile: SAG. 6 p.

Furbish, D.J. and S. Fagherazzi. 2001, oct. Stability of creeping soil and implications for hillslope evolution. *Water Resources Research* 37(10): 2607-2618.

Gallardo, G. 2002. Communal land ownership in Chile: the agricultural communities in the commune of Canela, Norte Chico (1600-1998). London, England: Ashgate Publishing Ltd. 440 p. (International Land Management Series).

Gallardo, G. 2006. Resource sustainability through the institutions of the commons: the case of Chile's semi-arid Norte Chico. (ch. 4, pp. 102-124). In: *Havnevik, K.; T. Negash and A. Beyene (ed.). Of global concern: rural livelihood dynamics and natural resource governance.* Stockholm, Sweden: Sida. 263 p. (Sida Studies series).

Gao, P. 2013. Rill and gully development processes. (Ch. 7, pp: 122-131). In: *Shroder, J.; R.A. Marston and M. Stoffel.* Treatise on geomorphology. Vol 7. Mountain and hillslope geomorphology. San Diego, Ca, USA: Academic Press. 388 p.

Gómez-Plaza, A.; M. Martínez-Mena; J. Albaladejo and V.M. Castillo. 2001, nov. Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. 2001, nov. *Journal of hydrology* 253(1-4): 211-226.

Harris, C.; J.S. Smith; M.C.R. Davies and B. Rea. 2008, jan. An investigation of periglacial slope stability in relation to soil properties based on physical modelling in the geotechnical centrifuge. *Geomorphology* 93(3-4): 437-459.

Hazelton, P. and B. Murphy. 2007. Interpreting soil test results: what do all the numbers mean. Collingwood, Australia: Csiro Publishing. 152 p.

Hilley, G.E. and I. Coutand. 2010, nov. Links between topography, erosion, rheological heterogeneity, and deformation in contractional settings: insights from the central Andes. *Tectonophysics* 495(1-2): 78-92.

Homer, I. y M. Casanova. 2011. Labranza de conservación en laderas. *Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo* 24: 59-74.

Horn, R.; K.H. Hartge; J. Bachmann and M.B. Kirkham. 2007, sep. Mechanical stresses in soils assessed from bulk-density and penetration-resistance data sets. *Soil Science Society of America Journal* 71(5): 1455-1459.

Huggett, R.J. 1998, jun. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena* 32(3-4): 155-172.

IREN (Instituto de Investigación de Recursos Naturales), Chile. 1977. Estudio de las comunidades agrícolas: IV Región. Santiago, Chile: IREN-CORFO. 149 p.

Jacinthe, P.A.; R. Lal and J.M. Kimble. 2002, jun. Carbon dioxide evolution in runoff from simulated rainfall on long-term no-till and plowed soils in southwestern Ohio. *Soil and Tillage Research* 66(1): 23-33.

Jorquera, C. 2001. Evolución agropecuaria de la Región de Coquimbo: análisis contextual para la conservación de la vegetación nativa (cap. 14, pp: 225-237). En: *Squeo, F.A.; G. Arancio y J.R. Gutiérrez (Eds.)*. Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo. La Serena, Chile: Universidad de La Serena. 372 p.

Kelly, E.F.; R. Aguilar; A.S. Muhaimed; P.C. Deutsch and R.D. Heil. 1988, oct. Profile reconstruction: a method to quantify changes in soil properties resulting from cultivation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 21(3-4): 153-162.

Khomo, L; A.S. Hartshorn; K.H. Rogers and O.A. Chadwick. 2011, oct. Impact of rainfall and topography on the distribution of clays and major cations in granitic catenas of southern Africa. *Catena* 87(1): 119-128.

King, L.C. 1957. The uniformitarian nature of hillslopes. *Transactions of the Edinburgh Geological Society* 17: 81-102.

Kompani-Zare, M.; M Soufi; H. Hamzehzarghani and M. Dehghani. 2011, sep. The effect of some watershed, soil characteristics and morphometric factors on the relationship between the gully volume and length in Fars Province, Iran. *Catena* 86(3): 150-159.

Kutílek, M. 2004, dec. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil and Tillage Research* 79(2): 175–184.

Lachica, M.; L. Recalde y E. Esteban. 1965. Análisis foliar. Métodos analíticos utilizados en la estación experimental Zaidín. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 24 (9-10): 589–610.

Lado M.; A. Paz and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of America Journal* 68: 935-942.

Lal, R. 2003, jul. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International* 29(4): 437-450.

Lal, R. 2004, nov. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123(1-2): 1-22

Lavee, H.; A.C. Imeson and P. Sarah. 1998, sep. The impact of climate change on geomorphology and desertification along a mediterranean-arid transect. *Land Degradation and Development* 9(5): 407-422.

Lebedeba, M.I.; R.C. Fletcher and S.L. Brantley. 2010, jan. A mathematical model for steady-state regolith production at constant erosion rate. *Earth Surface Processes and Landforms* 35: 508-524.

Lipiec, J.; R. Walcsak; B. Witkowska-Walczak; A. Nosalewicz; A. Slowinska-Jurkiewicz and C. Slawinski. 2007, dec. The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis. *Soil and Tillage Research* 97(2): 239-246.

Lohse, K.A. and Dietrich W.E. 2005, dec. Contrasting effects of soil development on hydrological properties and flow paths. *Water Resources Research* 41: W12419, 1-17.

Maher, K. 2010, may. The dependence of chemical weathering rates on fluid residence time. *Earth and Planetary Science Letters* 294(1-2): 101-110.

Matus, F.; A. Osorio; A. Acevedo; S. Ortega y R. Cazanga. 2002, jun. Efecto del manejo y algunas propiedades del suelo sobre la densidad aparente. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 2(1): 7-15.

McBratney, A.; T. Bishop and I. Teliatnikov. 2000, sep. Two soil profile reconstruction techniques. *Geoderma* 97(3-4): 209–221.

Metson, A.J. 1961. Methods of chemical analysis of soil survey samples. Wellington, New Zealand: Govt. Printers. 207 p.

Milne, G. 1936. Normal erosion as a factor of soil profile development. *Nature* 138: 541-548.

Moges, A. and N. Holden. 2008, sep. Estimating the rate and consequences of gully development, a case study of Umbulo catchment in Southern Ethiopia. *Land Degradation and Development* 19(5): 574-586.

Morgan, R. 2005. Soil erosion and conservation. 3rd ed. Malden, USA: Blackwell Publishing Ltd. 304 p.

Mudd, S.M. and D.J. Furbish. 2006, jun. Using chemical tracers in hillslope soils to estimate the importance of chemical denudation under conditions of downslope sediment transport. *Journal of Geophysical Research* 111(F2): F02021.

Mudd, S.M.; K. Yoo and E.J. Gabet. 2013. Influence of chemical weathering on hillslope forms. (Ch. 7, pp: 56-65). In: *Shroder, J.; R.A. Marston and M. Stoffel*. Treatise on geomorphology. Vol 7. Mountain and hillslope geomorphology. San Diego, CA, USA: Academic Press. 388 p.

Munro, D.S. and L.J. Huang. 1997, apr. Rainfall, evaporation and runoff responses to hillslope aspect in the Shenchong Basin. *Catena* 29(2): 131-144.

Muñoz-Robles, C.; N. Reid; P. Frazier; M. Tighe; S.V. Briggs and B. Wilson. 2010, nov. Factors related to gully erosion in woody encroachment in south-eastern Australia. *Catena* 83(2-3): 148-157.

Nimmo, J.R. 1997. Modeling structural influences on soil water retention. *Soil Science Society of America Journal* 61: 712-719.

Olson, T.C. 1997. Restoring the productivity of a glacial till soil after topsoil removal. *Journal of Soil and Water Conservation* 32(3): 130-132.

Oostwoud Wijdenes, D.; J. Poesen; L. Vandekerckhove; J. Nachtergaele and J. De Baerdemaeker. 1999, jul. Gully-head morphology and implications for gully development on abandoned fields in a semi-arid environment, Sierra de Gata, southeast Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 24(7): 585-603.

Peeters, I.; T. Rommens; G. Verstraeten; G. Govers; A. Van Rompaey; J. Poesen *et al.* 2006, aug. Reconstructing ancient topography through erosion modelling. *Geomorphology* 78(3-4): 250–264.

Pelle, T.; F. Scarciglia; E. Allevato; G. Di Pasquale; M. La Russa; D. Marino *et al.* 2013, mar. Reconstruction of Holocene environmental changes in two archaeological sites of Calabria (Southern Italy) using an integrated pedological and anthracological approach. *Quaternary International* 288: 206-214.

Pennock, D.J. 2003, feb. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. *Soil and Tillage Research* 69(1-2): 15-26.

Phillips, J.D.; M. Slattery and P. Gares. 1999. Truncation and accretion of soil profiles on coastal plain croplands: implications for sediment redistribution. *Geomorphology* 28: 119-140.

Poesen, J.; L. Vandekerckhove; J. Nachtergaele; D. Oostwoud Wijdenes; G. Verstraeten and B. Van Wesemael. 2002. Gully erosion in dryland environments. (Ch. 8, pp: 229-262). *In: Bull, L.J. and M.J. Kirkby.* Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels. London, England: Wiley. 229 p.

Poesen, J.; J. Nachtergaele; G. Verstraeten and C. Valentin. 2003, jan. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50(2-4): 91-133.

Porta, J.; M. López-Acevedo y C. Roquero. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3a ed. Madrid, España: Multi-Prensa. 849 p.

Rawls, W.J.; D.L. Brakensiek and K.E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions, ASAE* 25(5): 1316-1320 and 1328.

Rustomji, P. 2006, oct. Analysis of gully dimensions and sediment texture from southeast Australia for catchment sediment budgeting. *Catena* 67(2): 119-127.

Sadzawka, R. 1990. Métodos de análisis de suelos. Santiago, Chile: INIA. 130 p. (Serie La Platina N° 6).

Sadzawka, A. 2006a. Propiedades físico-químicas de los suelos I: reacción (pH), acidez y alcalinidad. (cap. 3, pp. 91-127). *En: Luzio, W. y M. Casanova (ed.).* Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 393 p.

Sadzawka, A. 2006b. Química, diagnóstico y recuperación de suelos afectados por sales. (cap. 5, pp. 159-191). *En: Luzio, W. y M. Casanova (ed.).* Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Santiago, Chile: Universidad de Chile. 393 p.

Sadzawka, A.; M. Carrasco; R. Grez; M. Mora; H. Flores y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile: revisión 2006. Santiago, Chile: INIA. 164 p. (Serie Actas INIA N° 34).

Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chillán, Chile: Universidad de Concepción. 80 p. (Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales N° 5).

Santibáñez, F.; P. Santibáñez; J. Hernández y D. Montaner. 2008. Análisis de vulnerabilidad del sector silvoagropecuario, recursos hídricos y edáficos de Chile frente a escenarios de cambio climático: impactos en los recursos edáficos de Chile frente a cambio climático. Santiago, Chile: AGRIMED. 98 p.

Schaetzl, R.J., 2013. Catenas and soils. (Ch. 4, pp: 145-158). In: *Shroder, J. and G.A. Pope. Treatise on geomorphology. Vol. 4. Weathering and Soils Geomorphology. San Diego, CA, USA: Academic Press. 388 p.*

Schoeneberger, P.J.; D.A. Wysocki; E.C. Benham and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils. 3th ed. Lincoln, NE, U.S.A: Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center. 294 p.

Seguel, O., V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003, jul. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica* 63(3): 287-297.

Sierra, C. 2003. Fertilización de cultivos y frutales en la zona norte. (Bol. Div. N°97), Centro Regional de Investigación Intihuasi, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). La Serena, Chile: INIA. 72 p.

Soil Survey Staff. 2014. Keys to Soil Taxonomy. 12th. ed. Washington DC, U.S.A.: USDA. 362 p.

Targulian, V. and S. Goryachkin. 2004, mar. Soil memory: types of record, carriers, hierarchy and diversity. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21(1): 1-8.

Taylor, H.M. and G.S. Brar. 1991, feb. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research* 19(2-3): 111-119.

Tenzer, R.; P. Sirguy; M. Rattenbury and J. Nicolson. 2011, aug. A digital rock density map of New Zealand. *Computers & Geosciences* 37(8): 1181-1191.

Tisdall, J.M. and J.M Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.

Valentin, C.; J. Poesen and Y. Li. 2005, oct. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena* 63(2-3): 132-153.

Van Oost, K.; G. Govers; T. Quine; G. Heckrath; J. Olesen; S. De Gryze and R. Merckx. 2005, nov. Landscape-scale modeling of carbon cycling under the impact of soil redistribution: The role of tillage erosion. *Global Biogeochemical Cycles* 19(4): GB4014.

Vanwalleghem, T.; J. Poesen; J. Nachtergaele and G. Verstraeten. 2005, jul. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology* 69(1-4): 76– 91.

Viles, H.A. 2013. Synergistic weathering processes. (Ch. 4, pp. 12-26). In: *Shroder, J. and G.A. Pope. Treatise on geomorphology. Vol 4. Weathering and Soils Geomorphology. San Diego, CA, USA: Academic Press. 388 p.*

Yanda, P. 2000, sep. Use of soil horizons for assessing soil degradation and reconstructing chronology of degradation processes: the case of Mwisanga catchment, Kondoa, central Tanzania. *Geomorphology* 34(3-4): 209–225.

Yoo, K.; R. Amundson; A. Heimsath and W. Dietrich. 2005, jul. Erosion of upland hillslope soil organic carbon: Coupling field measurements with a sediment transport model. *Global Biogeochemical Cycles* 19(3): GB3003.

Zapata, F.; G. Dercon y M. Casanova. 2010. Evaluación de la erosión de suelo: métodos isotópicos (pp. 460-469). En: Congreso de la Organización Internacional de Conservación de Suelo (16°, 8 al 12 de noviembre de 2010, Santiago, Chile). Proceeding contribution in extenso. Eds. Casanova, M; G. Ruiz y E. Zagal. Santiago, Chile: SCHCS, SAG, Universidad Mayor, Universidad de Concepción. 530 p.

Zwertvaegher, A.; P. Finke; P. De Smedt; V. Gelorini; M. Van Meirvenne; M. Bats *et al.* 2013, oct. Spatio-temporal modeling of soil characteristics for soilscape reconstruction. *Geoderma* 207-208: 166–179.

ANEXO I

Definición y características de horizontes argílicos (Bt), de acuerdo a Soil Survey Staff (2014).

An argillic horizon is normally a subsurface horizon with a significantly higher percentage of phyllosilicate clay than the overlying soil material. It shows evidence of clay illuviation. The argillic horizon forms below the soil surface, but it may be exposed at the surface later by erosion.

Required characteristics

1. All argillic horizons must meet *both* of the following requirements:

a. *One* of the following:

- (1) If the argillic horizon meets the particle-size class criteria for coarse-loamy, fine loamy, coarse-silty, finesilty, fine, or very-fine or is loamy or clayey, including skeletal counterparts, it must be at least 7.5 cm thick or at least one-tenth as thick as the sum of the thickness of all overlying horizons, whichever is greater; *or*
- (2) If the argillic horizon meets the sandy or sandyskeletal particle-size criteria, it must be at least 15 cm thick; *or*
- (3) If the argillic horizon is composed entirely of lamellae, the combined thickness of the lamellae that are 0.5 cm or more thick must be 15 cm or more; *and*

b. Evidence of clay illuviation in at least *one* of the following forms:

- (1) Oriented clay bridging the sand grains; *or*
- (2) Clay films lining pores; *or*
- (3) Clay films on both vertical and horizontal surfaces of peds; *or*
- (4) Thin sections with oriented clay bodies that are more than 1 percent of the section; *or*
- (5) If the coefficient of linear extensibility is 0.04 or higher and the soil has distinct wet and dry seasons, then the ratio of fine clay to total clay in the illuvial horizon is greater by 1.2 times or more than the ratio in the eluvial horizon; *and*

2. If an eluvial horizon remains and there is no lithologic discontinuity between it and the illuvial horizon and no plow layer directly above the illuvial layer, then the illuvial horizon must contain more total clay than the eluvial horizon within a vertical distance of 30 cm or less, as follows:

a. If any part of the eluvial horizon has less than 15 percent total clay in the fine-earth fraction, the argillic horizon must contain at least 3 percent (absolute) more clay (10 percent versus 13 percent, for example); *or*

b. If the eluvial horizon has 15 to 40 percent total clay in the fine-earth fraction, the argillic horizon must have at least 1.2 times more clay than the eluvial horizon; *or*

c. If the eluvial horizon has 40 percent or more total clay in the fine-earth fraction, the argillic horizon must contain at least 8 percent (absolute) more clay (42 percent versus 50 percent, for example).

APÉNDICE I

Cotas y distancias del perfil longitudinal

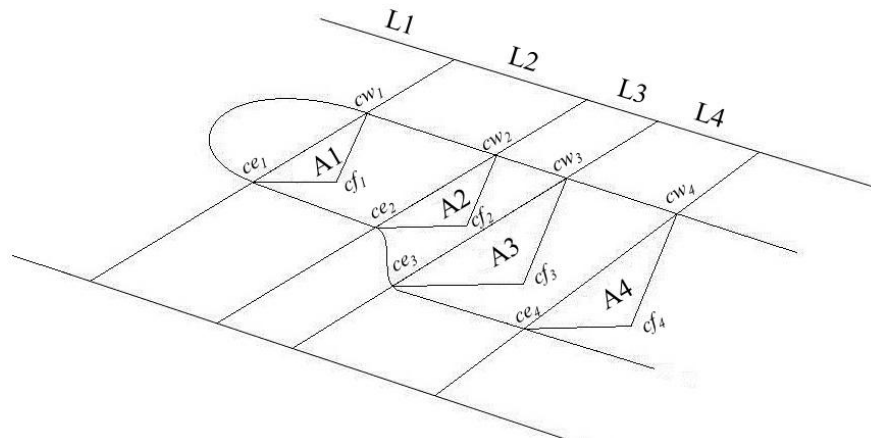
Punto	Distancia		Cota		Pedones
	acumulada	Parcial	Superficie	fondo de cárcava	
(m)					
1	0,00	0,00	71,50		P1-E
2	34,07	34,07	67,22		P2-E
3	56,15	22,08	62,31		
4	80,23	24,08	56,42		
5	87,89	7,65	53,93		
6	94,35	6,47	52,16	50,56	P3-E
7	95,99	1,64	51,47	49,91	
8	97,30	1,31	51,38	49,46	
9	98,38	1,08	50,78	48,75	
10	100,67	2,29	50,56	47,92	
11	103,17	2,50	49,62	46,94	
12	104,38	1,21	49,30	46,53	
13	105,52	1,14	48,49	46,10	
14	107,03	1,51	48,36	46,09	P4-E
15	109,58	2,55	49,17	46,09	
16	110,88	1,30	47,33	45,18	
17	114,00	3,12	46,01	44,52	
18	114,05	0,05	45,01	44,31	
19	115,32	1,27	45,73	43,59	
20	117,39	2,07	44,76	42,66	
21	119,21	1,82	42,92		
22	123,09	3,88	43,36		
23	128,12	5,03	40,97		
24	133,06	4,94	43,35		
25	140,95	7,89	45,78		
26	146,97	6,02	49,10		
27	158,77	11,80	50,04		
28	169,28	10,51	52,35		P5-P
29	183,94	14,66	58,66		

APÉNDICE II

Determinación del volumen de la cárcava

Punto	Cota		Profundidad	Ancho	Área	Distancia		Volumen
	E	fondo				W	acumulada	
		(m)			(m ²)	(m)	(m)	(m ³)
5	53,93	53,93	53,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	52,16	50,56	52,43	1,74	3,30	2,85	7,30	10,41
7	51,47	49,91	51,87	1,76	3,20	2,79	9,40	5,93
8	51,38	49,46	51,51	1,99	3,30	3,27	10,61	3,67
9	50,78	48,75	51,14	2,21	2,30	2,51	12,20	4,60
10	50,56	47,92	50,64	2,68	4,30	5,76	14,40	9,10
11	49,62	46,94	49,81	2,78	4,78	6,63	17,80	21,06
12	49,30	46,53	49,40	2,82	4,40	6,20	19,80	12,83
13	48,49	46,10	48,73	2,51	3,74	4,68	21,80	10,89
14	48,36	46,09	48,27	2,22	4,14	4,60	23,50	7,90
15	49,17	46,09	47,46	2,22	3,45	3,33	26,30	11,11
16	47,33	45,18	46,73	1,85	3,37	3,07	28,70	7,68
17	46,01	44,52	45,70	1,34	2,56	1,70	33,40	11,19
18	45,01	44,31	45,48	0,93	3,05	1,41	34,60	1,86
19	45,73	43,59	45,17	1,86	4,50	4,15	36,60	5,56
20	44,76	42,66	44,39	1,92	3,89	3,71	40,50	15,33
21	42,92	42,92	42,92	0,00	0,00	0,00	42,20	3,15
TOTAL								142,27

$$\text{Volumen Total (m}^3\text{)} = \left(\frac{A1 + 0}{2} * L1 \right) + \left(\frac{A2 + A1}{2} * L2 \right) + \dots + \left(\frac{Ax(m^2) + Ay(m^2)}{2} * Lx(m) \right)$$



donde Ax corresponde al área de la figura ce_x-cf_x-cw_x (ce_x: cota este del punto x; cw_x: cota oeste del punto x; cf_x: cota fondo del punto x) y Lx a la distancia parcial entre los puntos x e y.

APÉNDICE III

Descripciones morfológicas definitivas de los pedones

Perfil P1-E

Profundidad (cm)	Características físicas y morfológicas
0-18 A	Pardo (10 YR 4/3)s, pardo oscuro (10 YR 3/3)h; franco arenoso gravoso; guijarros angulares en un 10%; bloques subangulares medios débiles que rompen a granular fino moderado; ligeramente adhesivo, moderadamente plástico; raíces finas comunes; poros finos comunes, moderadamente pocos poros medios; límite lineal claro.
18-50 Bt	Pardo oscuro (10 YR 3/3)s, pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4)h; franco arcillo limoso gravoso; prismas gruesos fuertes; muy duro en seco; ligeramente adhesivo, plástico; muy pocas raíces finas; muy pocos poros finos; límite ondulado claro.
50-100 (y más) Cz	Color variegado; arenoso grueso gravoso; masivo; moderadamente duro en seco; no adhesivo, no plástico; granito en estado de meteorización avanzado, micas abundantes.

Perfil P2-E

Profundidad (cm)	Características físicas y morfológicas
0-20 A	Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); franco arenoso muy gravoso; grava gruesa en un 10%; bloque subangulares medios y finos débiles que rompen a granular fino débil; adhesivo, ligeramente plástico; raíces muy finas abundantes, muy pocas raíces medias; poros medios comunes, muchos poros finos; larvas de coleópteros y lombrices comunes; límite lineal abrupto.
20-40 Bt	Pardo (7,5 YR 4/4), pardo (7,5 YR 5/4) en amasado; arcillo limoso; prismas gruesos débiles que rompen a bloques subangulares gruesos fuertes y finos fuertes; ligeramente adhesivo, plástico; raíces muy finas comunes, muy pocas raíces medias; moderadamente pocos poros finos; límite lineal abrupto.
40-55 Bz	Pardo amarillento (10 YR 5/6); arcillo limoso; prismas gruesos moderados; no adhesivo, plástico; muy pocas raíces muy finas; moderadamente pocos poros finos; límite lineal claro.
55-100 (y más) Cz	Color variegado; arenoso; grano simple; no adhesivo, no plástico; granito en estado de meteorización avanzado, micas abundantes.

Perfil P3-E

Profundidad (cm)	Características físicas y morfológicas
0-50 A	Pardo (7,5 YR 4/4)s, pardo fuerte (7,5 YR 4/6)h; franco arcillo limoso muy gravoso; prismas gruesos fuertes con presencia de manganeso en sus caras; duro en seco; ligeramente adhesivo, plástico; muy pocas raíces muy finas; muchos poros muy finos y moderadamente pocos poros finos; límite ondulado claro.
50-150 (y más) Bz	Pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4)s, pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4)h; franco arcillo limoso gravoso; prismas gruesos fuertes; moderadamente duro en seco; ligeramente adhesivo, plástico; muchos poros muy finos, poros finos comunes, moderadamente pocos poros medios.

Observaciones: Existe una estrata gravosa superficial de arrastre de 1 cm de espesor color pardo amarillento claro (10 YR 6/4)s y pardo (10 YR 4/4)h.

Perfil P4-E

Profundidad (cm)	Características físicas y morfológicas
0-70 A	Pardo (7,5 YR 4/4)s, pardo fuerte (7,5 YR 4/6)h; franco arcillo limoso muy gravoso; prismas gruesos fuertes con presencia de manganeso en sus caras; duro en seco; ligeramente adhesivo, plástico; muy pocas raíces muy finas; muchos poros muy finos y moderadamente pocos poros finos; límite ondulado claro.
70-180 (y más) Bz	Pardo amarillento oscuro (10 YR 4/4)s, pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4)h; franco arcillo limoso gravoso; prismas gruesos fuertes; moderadamente duro en seco; ligeramente adhesivo, plástico; muchos poros muy finos, poros finos comunes, moderadamente pocos poros medios.

Observaciones: Existe una estrata gravosa superficial de arrastre de 1 cm de espesor color gris claro (10 YR 7/2)s y pardo oscuro (10 YR 3/3)h.

Perfil P5-P

Profundidad (cm)	Características físicas y morfológicas
0-40 A	Pardo (10 YR 4/3)s, pardo oscuro (10 YR 3/3)h; franco muy gravoso; bloques subangulares gruesos débiles que rompen a granular fino moderado; blando en seco; adhesivo, ligeramente plástico; muchas raíces muy finas; muy pocos poros medios, poros finos y muy finos comunes; límite lineal difuso.
40-72 C1	Pardo amarillento (10 YR 5/4)s, pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4)h; franco gravoso; masivo; duro en seco; adhesivo, ligeramente plástico; muchos poros muy finos, finos comunes, pocos poros medios; límite lineal abrupto.
72-103 C2	Pardo amarillento oscuro (10 YR 2/4); franco arcillo limoso gravoso; masivo; moderadamente adhesivo, plástico; poros muy finos comunes, muy pocos poros finos; límite lineal claro.
103-135 (y más) C3	Pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4); franco arcillo limoso gravoso; masivo; moderadamente adhesivo, moderadamente plástico; poros muy finos comunes.

APÉNDICE IV

Valores de resistencia a la penetración en los pedones de la catena

Profundidad (cm)	Resistencia a la penetración					
	P1-E	P2-E	P3-E	P4-E	P5-P	P6
	(MPa)					
0-5	2,21±1,17	2,29±0,43	1,33±0,48	3,26±0,76	1,57±0,16	1,09±0,49
6-10	4,46±1,79	2,81±0,34	1,94±1,23	6,05±0,00	2,65±0,30	1,85±0,69
11-15	4,65±2,01	2,15±0,50	2,44±2,01	<i>nd</i>	3,63±0,85	2,45±1,27
16-20	5,89±1,74	2,10±0,58	2,54±0,86	<i>nd</i>	3,68±0,86	2,97±1,25
21-25	6,67±0,00	4,49±2,09	4,88±1,83	<i>nd</i>	3,47±0,74	3,03±0,97
26-30	<i>nd</i>	5,88±2,40	5,11±0,38	<i>nd</i>	3,13±0,68	4,00±2,10
31-35	<i>nd</i>	7,69±0,00	<i>Nd</i>	<i>nd</i>	3,72±0,00	3,19±0,00
36-40	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>Nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>

nd: no determinado.