

Desarrollo de un nuevo modelo geoedafológico sobre la génesis, propiedades y taxonomía de los Vertisoles y suelos vérticos de la Región Pampeana Argentina

Autor: Emiliano Miguel Bressan

Tesis doctoral UDC / Año 2023

Programa Oficial de Doctorado en Investigación Agraria y Forestal





UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Programa Oficial de Doctorado en Investigación Agraria y Forestal

Tesis Doctoral

Desarrollo de un nuevo modelo geoedafológico
sobre la génesis, propiedades y taxonomía de
los Vertisoles y suelos vérticos de la Región
Pampeana Argentina

Emiliano Miguel Bressan

Mayo 2023

DEDICATORIA

A mi hijo León que su llegada a este mundo es el mejor ejemplo de que nada en la vida es fácil y que todo en ella se logra con mucha perseverancia, esfuerzo y fe en Dios.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer a mi director el Dr. Héctor J.M. Morrás por confiar en mí nuevamente para poder realizar el Doctorado y darme la oportunidad de seguir creciendo como profesional y como Jefe del Grupo de Mineralogía y Micromorfología de Suelos del Instituto de Suelos del INTA Castelar. Gracias a usted Héctor aprendí las cualidades y el esfuerzo que se requiere para ser un investigador para cualquier área de la ciencia en la Argentina. Debo agradecerle su total predisposición y consejos que me brindó durante la realización del Doctorado.

En segundo lugar, a la Universidad de La Coruña por darme la posibilidad de realizar mi Doctorado en tan prestigiosa casa de altos estudios de España.

En tercer lugar, a todo el personal del Instituto de Suelos del INTA Castelar por brindarme toda su infraestructura para poder realizar las determinaciones previstas para realización de mi Doctorado.

Y por último a mi mujer Yanina y mi hijo León por bancarme en los buenos y difíciles momentos que atravesé durante la realización de mi Doctorado.

RESUMEN

La Pampa Ondulada es una de las subregiones de la gran llanura pampeana y la más importante de la misma en cuanto a la producción agrícola. Los materiales parentales de los suelos son sedimentos loésicos cuaternarios, existiendo una marcada controversia respecto al origen y composición de los mismos. Hacia el este de la subregión los Argiudoles vérticos son dominantes, en tanto en el resto del área los Argiudoles típicos son los suelos zonales característicos. Según algunos autores, el carácter vértico de los Argiudoles se debe a la neoformación pedogénica de esmectitas. Por el contrario, según otros las arcillas esmectíticas serían heredadas, encontrándose ya en el material parental de estos suelos. Por otro lado, dado que el material de los Argiudoles típicos presenta también expansibilidad elevada, ciertas propiedades físicas utilizadas en la Taxonomía no resultan útiles para discriminar entre los dos subgrupos de Argiudoles de esta área. En ella se han distinguido dos niveles de sedimentarios superficiales. El inferior es un sedimento loésico esmectítico, cubierto por un depósito loésico illítico relativamente grueso. Nuevos estudios realizados han puesto en manifiesto la existencia de estructura diapíricas en el sedimento inferior que permanecían ocultas hasta la actualidad. Por lo tanto, ahora se puede considerar que los Vertisoles también fueron los suelos dominantes en esta región posteriormente enterrados por un loess grueso. En los períodos húmedos, las cimas de las laderas convexas se habrían erosionado parcialmente, dejando el material esmectítico subyacente más cerca de la superficie. En consecuencia, los molisoles actuales sobre el paisaje desarrollaron propiedades vérticas debido a la mezcla de materiales y en función de la mayor o menor proximidad a la paleosuperficie. Por lo tanto, estos Vertisoles pampeanos y Molisoles vérticos pueden considerarse poligenéticos y relacionados por diferentes grados de un mismo proceso de génesis.

RESUMO

A Pampa Ondulada é unha das subrexións da gran chaira pampeana e a máis importante da mesma en canto á produción agrícola. Os materiais de partda dos solos son sedimentos loéssicos cuaternarios, existindo unha marcada controversia respecto á orixe e composición dos mesmos. Cara ao leste da subrexión os Argiudoles vérticos son dominantes, en tanto no resto da área os Argiudoles típicos son os solos zonais característicos. Segundo algúns autores, o carácter vértico dos Argiudoles débese á neoformación edafoxénica de esmectitas. Pola contra, segundo outros as arxilas esmectíticas serían herdadas, atopándose xa no material parental destes solos. Doutra banda, dado que o material dos Argiudoles típicos presenta tamén expansibilidade elevada, certas propiedades físicas utilizadas na Taxonomía non resultan útiles para discriminar entre os dous subgrupos de Argiudoles desta área. Nela distinguíronse dous niveis de sedimentarios superficiais. O inferior é un sedimento loéssico esmectítico, cuberto por un depósito loessico illítico relativamente grosso. Os novos estudos realizados puxeron de manifesto a existencia de estrutura diapiricas no sedimento inferior que permanecían ocultas até a actualidade. Por tanto, agora pódese considerar que os Vertisoles tamén foron os solos dominantes nesta rexión posteriormente enterrados por un loess grosso. Nos períodos húmidos, as cimas das ladeiras convexas haberíanse erosionado parcialmente, deixando o material esmectítico subxacente máis preto da superficie. En consecuencia, os molisoles actuais sobre el paisaxe desenvolveron propiedades vérticas debido á mestura de materiais e en función da maior ou menor proximidade á paleosuperficie. Por tanto, estes Vertisoles pampeanos e Molisoles vérticos poden considerarse polixenéticos e relacionados por diferentes graos dun mesmo proceso de xénese.

SUMMARY

The Rolling Pampa is one of the subregions of the great pampas plain and the most important on agricultural production. The parent materials of the soils are Quaternary loessic sediments, and both their origin and composition are still a controversial subject. To the east of the subregion, the Vertic Argiudolls are dominant, while in the rest of the area the Typic Argiudolls are the characteristic zonal soils. According to some authors, the vertic properties of these Argiudolls are due to the pedogenic neoformation of smectites. On the contrary, according to others, smectitic clays would be inherited from their parent material. On the other hand, since the Typic Argiudolls also show high expansibility, certain physical properties used in the Taxonomy are not useful for discriminating between the two subgroups of Argiudolls in this area. In the Rolling Pampa two superficial sedimentary levels have been distinguished. The lower one is a smectitic loessic sediment, covered by a relatively thick illitic loessic deposit. New studies undertaken in large pit have revealed the existence of diapiric structures in the lower sediment, which remained hidden up to the present. Therefore, it can now be considered that Vertisols were also dominant soils here, later buried by the thick loess. In the humid periods, the summit of convex slopes would have been partly eroded, leaving the underlying smectitic material closer to the surface. Consequently, current Mollisols on top of the landscape developed vertic properties due to the mixing of materials and depending on the greater or lesser proximity to the paleosurface. Therefore, these pampean Vertisols and vertic Mollisols can be considered polygenetic and related by different degrees of a same process.

ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Hipótesis.....	13
3. Objetivos	
3. 1. Objetivo Principal.....	14
3.2. Objetivos Específicos.....	14
4. Materiales y Métodos	
4.1. Caracterización de los perfiles estudiados.....	15
4.2. Descripción de los perfiles estudiados.....	18
4.3. Determinaciones de laboratorio.....	34
4.4. Análisis Estadístico.....	42
5. Resultados y Discusión	
5.1. Granulométricos.....	43
5.2. Mineralógicos.....	48
5.3. Susceptibilidad Magnética.....	56
5.4. Químicos y Físico-Químicos.....	59
5.5. Retención de Agua.....	67
5.6. Porosidad.....	74
5.7. Expansión y Contracción.....	78
5.8. Estadísticos.....	83
6. Conclusiones	
6.1. Conclusiones en español.....	105

6.2. Conclusions.....	109
7. Bibliografia citada.....	113
8. Apéndice.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de la distribución y clasificación de suelos de la Argentina (adaptado de Rodríguez et al., 2019).....	1
Figura 2- Mapa de la sub-zonas geo-edafológicas en la Pampa Ondulada. (Morras et al., 2022).....	8
Figura 3- Mapa de la Región Pampeana con sus subregiones con la localización de los perfiles que serán estudiados.....	15
Figura 4- Mapa de unidades taxonómicas dominantes con la localización de los tres perfiles que serán estudiados.....	15
Figura 5- Bajo y cresta del Perfil de suelo descripto en las proximidades de La Paz (Provincia De Entre Ríos).....	18
Figura 6- Bajo del Perfil de suelo descripto en las proximidades de La Paz (Provincia de Entre Ríos).....	19
Figura 7- Cresta del Perfil de suelo descripto en las proximidades de La Paz (Provincia de Entre Ríos).....	21
Figura 8- Bajo y cresta del Perfil de suelo descripto en las proximidades de Castelar (Provincia Buenos Aires).....	23
Figura 9- Bajo del Perfil de suelo descripto en las proximidades de Castelar (Provincia Buenos Aires).....	23
Figura 10- Bajo del Perfil de suelo descripto en las proximidades de Castelar (Provincia Buenos Aires).....	26
Figura 11- Bajo y cresta del Perfil de suelo descripto en las proximidades de Los Hornos (Provincia de Buenos Aires).....	28

Figura 12 - Cresta del Perfil de suelo descrito en las proximidades de Los Hornos (Provincia de Buenos Aires).....	29
Figura 13- Bajo del Perfil de suelo descrito en las proximidades de Los Hornos (Provincia de Buenos Aires).....	31
Figura 14- Variación del contenido de Arena (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	44
Figura 15- Variación del contenido de Limo (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	45
Figura 16- Variación del contenido de Arcilla (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	46
Figura 17 -Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas de los horizontes A ₁ , Bt ₁ , BC _{kss} y C _{kss} del sector del Bajo del perfil de La Paz.....	49
Figura 18 -Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas de los horizontes A ₁ , AC _{2kss} , C _{1kss} y C _{2kss} del sector de la Cresta del perfil de La Paz.....	50
Figura 19 -Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas de los horizontes A ₁ , Bt _{ss2} , BC ₁ y 2C _k del sector del Bajo del perfil de La Plata.....	51
Figura 20 -Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas de los horizontes A ₁ , Bt ₁ , BC y BC ₂ del sector de la Cresta del perfil de La Plata.....	52

Figura 21 -Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas de los horizontes A ₁ , Bt _{1ss} , 2Bt _{ss2} y 2Btk ₂ del sector del Bajo del perfil de Castelar.....	53
Figura 22 -Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales, glicoladas y calcinadas de los horizontes A ₁ , Bt _{1ss} , 2BC y 3Btk del sector de la Cresta del perfil de Castelar.....	54
Figura 23 - Variación de la Susceptibilidad Magnética en baja frecuencia (kHz) con la profundidad de los suelos analizados.....	56
Figura 24 - Variación del contenido de Carbono Orgánico (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	60
Figura 25- Variación del contenido de Fósforo extractable (mg Kg ⁻¹) con la profundidad en los suelos estudiados.....	61
Figura 26- Variación del pH con la profundidad de los suelos estudiados.....	63
Figura 27- Variación del CIC Total (cmol Kg ⁻¹) con la profundidad de los suelos estudiados.....	64
Figura 28-Variación del contenido de Potasio de intercambio (cmol/Kg) con la profundidad de los suelos estudiados.....	66
Figura 29 -Variación del contenido de agua de saturación (%) con la profundidad de los suelos estudiados.....	68
Figura 30 - Variación de la humedad equivalente (HEq) con la profundidad de los suelos estudiados.....	69
Figura 31 - Variación de la capacidad de campo (CC) con la profundidad de los suelos estudiados.....	70

Figura 32- Variación del punto de marchitez permanente (PMP) con la profundidad de los suelos estudiados.....	72
Figura33- Variación de la porosidad total con la profundidad en los suelos estudiados.....	74
Figura 34- Variación del porcentaje de macroporos con la profundidad de los suelos estudiados.....	75
Figura 35 - Variación del porcentaje de mesoporos con la profundidad de los suelos estudiados.....	76
Figura 36 - Variación del porcentaje de microporos con la profundidad de los suelos estudiados.....	77
Figura 37- Variación del COLE con la profundidad de los suelos estudiados.....	79
Figura 38 - Componentes Principales de los horizontes Ap, A ₁ , BA y AC de los suelos estudiados.....	85
Figura 39- Componentes Principales de los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk y 3Btk de los suelos estudiados.....	89
Figura 40 - Componentes Principales de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados.....	92
Figura 41 - Componentes Principales de los horizontes A, AB y BA de los suelos estudiados.....	96
Figura 42- Componentes Principales de los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk y 3Btk de los suelos estudiados.....	100
Figura 43- Componentes Principales de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1- Espacio interfoliar en Å de reflexiones basales en pequeños ángulos (2°-15° 2θ/min) Fuente: Robert, 1975; Brindley & Brown, 1980.....	34
Tabla N° 2 - Clasificación de poros por tamaño y función.....	40
Tabla N° 3 - Capacidad de expansión-contracción citada por Thomas et al. 2000.....	42
Tabla N° 4 - Variación del COLE con la profundidad de los distintos horizontes del bajo y de la cresta del perfil de Los Hornos y su respectiva clasificación según Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas et al. 2000).....	80
Tabla N° 5 - Variación del COLE con la profundidad de los distintos horizontes del bajo y de la cresta del perfil de Castelar y su respectiva clasificación según Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas et al. 2000).....	80
Tabla N° 6 - Variación del COLE con la profundidad de los distintos horizontes del bajo y de la cresta del perfil de La Paz y su respectiva clasificación según Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas et al. 2000).....	81
Tabla N° 7 - Valores de Extensibilidad Lineal del bajo y de la cresta de los perfiles de Los Hornos, Castelar y La Paz.....	82
Tabla N° 8- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Ap, A1, BA y AC de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	84
Tabla N° 9- - Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Ap, A1, A2, AC y BA de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05**; p < 0,01 ***).....	86
Tabla N° 10- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Bt, Btss, Bk, Bkss, 2Btk, 3Btk de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***)....	88

Tabla N° 11 -Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk, 3Btk de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	90
Tabla N° 12- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	91
Tabla N° 13- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	93
Tabla N° 14- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes A, A2, AB y BA de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	94
Tabla N° 15- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Ap, A1, A2, AC y BA de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	97
Tabla N° 16- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Bt, Btss, Bk, Bkss, 2Btk, 3Btk de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***)....	98
Tabla N° 17 - Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk, 3Btk de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	101
Tabla N° 18- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	102
Tabla N° 19- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados. (p < 0,1 *; p < 0,05 **; p < 0,01 ***).....	104

APENDICES

Análisis Granulométricos.....	124
Análisis de Susceptibilidad Magnética.....	125
Análisis Químicos y Físico-Químicos.....	127
Análisis de Retención de Agua.....	128
Análisis de Porosidad.....	130

ABREVIATURAS

E: esméctica

I/E: illita esmectita

I: illita

C: caolinita

SM: susceptibilidad magnética

LF: baja frecuencia

CIC: capacidad de intercambio catiónico

Ki: potasio intercambiable

P: fósforo extractable

CO: carbono orgánico

HEq: humedad equivalente

Dap: densidad aparente

PT: porosidad total

PMP: punto de marchitez permanente

CC: capacidad de campo

COLE: coeficiente de extensibilidad lineal

EL: extensibilidad lineal

LPC: Perfil de La Paz cresta

LPB: Perfil de La Paz bajo

CC: Perfil de Castelar cresta

CB: Perfil de Castelar bajo

LHC: Perfil de Los Hornos cresta

LHB: Perfil de Los Hornos bajo

1. INTRODUCCIÓN

Los Vertisoles ocupan en el mundo un área de 3.2 millones de Km² (2,4 % de la superficie mundial) distribuidos en 82 países, siendo los que poseen mayor superficie: India (25%), Australia (22%) y Sudán (16%) (Imbellone et. al., 2010).

En Argentina, los Vertisoles se encuentran en varias regiones, pero su presencia es particularmente relevante en la parte sur de la Región Mesopotámica (que incluye la Pampa Mesopotámica) y otras subregiones en la parte oriental de la Región Pampeana. Además, los Vertisoles también se pueden encontrar en áreas restringidas del Chaco argentino y la región patagónica (FAO, 2022).

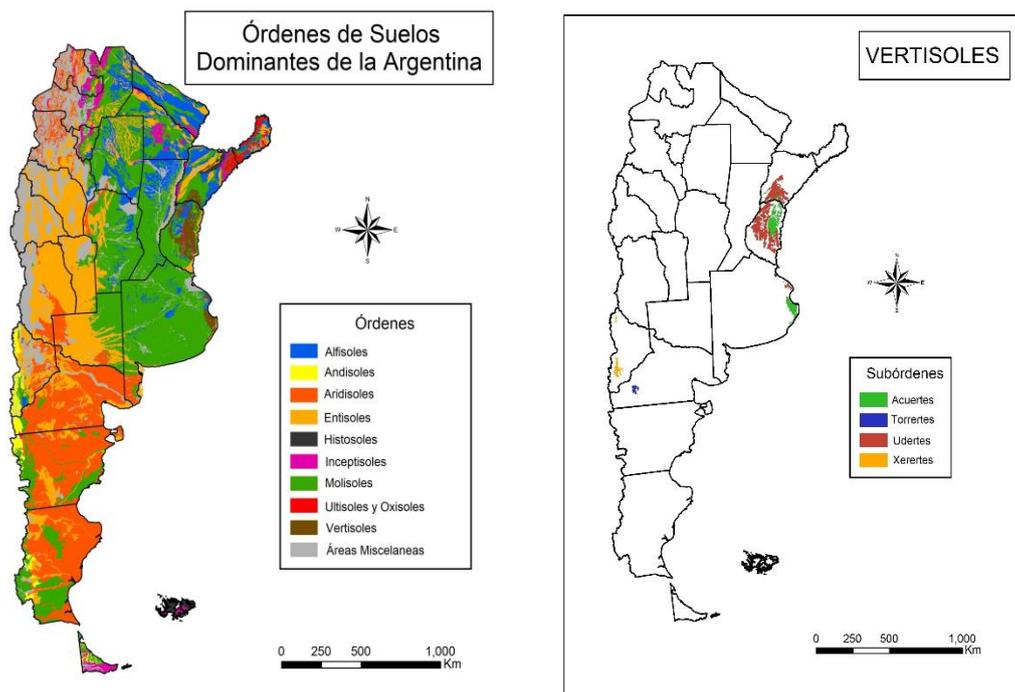


Figura 1- Mapa de la distribución y clasificación de suelos de la Argentina (adaptado de Rodríguez et al., 2019).

La región mesopotámica es una extensa zona enmarcada por los grandes Ríos Paraná y Uruguay. En ella, el paisaje se caracteriza por la existencia de numerosos arroyos

que atraviesan los sedimentos fluviales-lacustres del Plio-Pleistoceno, dando como resultado un relieve suavemente ondulado. El clima es subtropical húmedo, con precipitaciones anuales que oscilan entre unos 1100 mm en el sur y unos 1400 mm en la parte norte. El régimen hídrico es údico, o eventualmente ácuico. La vegetación es una mezcla de sabanas abiertas, pastizales arbolados y bosque semiseco. En este contexto geográfico, los Vertisoles constituyen el principal tipo de suelo, ocupando alrededor de 3 millones de hectáreas (FAO, 2022).

El material parental de los Vertisoles de esta región, así como de los Alfisoles y Molisoles vérticos asociados, lo constituyen sedimentos de textura limo-arcillosa o franco-arcillosa, con predominio de esmectitas en su fracción arcillosa y cuarzo en la gruesa. Poseen además una proporción considerable de carbonato cálcico, algunas segregaciones de yeso y manganeso, y óxidos de hierro (FAO, 2022).

Según Coulombe y colaboradores (1996), el material parental es uno de los factores de formación más importante en la génesis de suelos con propiedades vérticas. Puede ser de variado origen y edad, pero siempre provee, ya sea a partir de herencia o neoformación, elevado contenido de arcillas con alta superficie específica y contenido de bases. Estas últimas propiedades favorecen la formación y estabilidad de los minerales de arcillas. No obstante, la distinción entre si son heredadas o neoformadas sigue siendo especulativa, especialmente en el caso de depósitos sedimentarios.

Distintos autores (Buol et al., 1980; Wilding, 1985; Wilding & Puentes, 1988) definen la vertisolización o argiliturbación como un proceso que tiene lugar cuando el material del suelo posee la propiedad de contraerse y expandirse de manera considerable según las variaciones del contenido de humedad. Esta propiedad de expansión y contracción está determinada por la naturaleza del material originario, en cual los

minerales de arcilla expandibles y no expandibles participan en proporciones importantes (Imbellone et al., 2010).

La alternancia de procesos de expansión y contracción da como resultado, en estos suelos, grietas en profundidad durante la estación seca, y formación de slickensides y agregados en forma de cuña en los horizontes subsuperficiales del suelo. La formación de estas estructuras se debe a las tensiones diferenciales gobernadas por el contenido de humedad y el cambio de volumen (Dudal & Eswaran, 1998). La tensión varía de un punto a otro tanto verticalmente como horizontalmente. Este proceso de expansión y contracción resulta en la mezcla del material edáfico, lo cual es el principio central del proceso de argiliturbación (Wilding & Tessier, 1988). Las fuerzas de corte dan como resultado estructuras diapíricas o en chimenea dentro del suelo, las cuales se reflejan en una microtopografía superficial de depresiones bordeadas por crestas llamadas gilgai, aunque no todos los Vertisoles muestran este fenómeno superficial (Schaeftz & Thompson, 2015).

Además de la mineralogía, el proceso argiliturbación está influido por el contenido de arcilla y la relación entre arcilla fina y arcilla gruesa, la composición del complejo de cambio, y el patrón de distribución de humedad del perfil, en el que influye el clima y la posición del suelo en el paisaje (Imbellone et al., 2010).

El clima es el segundo factor en importancia en la formación y distribución de los Vertisoles (Coulombe et al., 1996). Según Imbellone y colaboradores (2010), estos suelos deben experimentar cambios estacionales de humedad, ya sea por alternancia de estaciones húmedas y secas, o por períodos de déficit hídrico durante la estación de crecimiento. Más allá de este patrón de periodicidad estacional, no necesariamente anual, los Vertisoles y suelos vérticos se forman en el mundo en un amplio intervalo de condiciones climáticas, con temperaturas medias anuales entre 0° y superiores a 25°C, y

precipitaciones medias anuales entre 250 y 3000 mm. En zonas de altas precipitaciones como la Región Pampeana, la migración diferencial de arcillas potencia el enriquecimiento de arcilla fina en los horizontes subsuperficiales, favoreciendo el desarrollo de propiedades vérticas (Tasi, 2009).

La topografía es un factor que tiene una menor influencia en la formación inicial de Vertisoles y suelos vertisólicos en comparación con los factores de formación antes mencionados. No obstante, una vez formado el microrrelieve gilgai, en los suelos ubicados en las posiciones más bajas del relieve se favorecería la acumulación y retención de bases y sílice, y la formación y equilibrio químico de los minerales esmectíticos, aumentando la capacidad de intercambio catiónico (Coulombe et al., 1996). Muchos Vertisoles se desarrollan en paisajes y materiales jóvenes, aunque también pueden estar en superficies geomórficas antiguas (Imbellone et al., 2010).

Coulombe y colaboradores (1996) observaron que las expresiones morfológicas del proceso de vertisolización son: el microrrelieve gilgai, estructuras diapíricas, horizontalización cíclica, agrietamiento superficial y subsuperficial, existencia de agregados cuneiformes y presencia de caras de fricción (slickensides).

Según Wilding et al. (1990), numerosos autores advierten de los problemas que plantea la descripción de la variabilidad de los suelos con microrrelieve gilgai, debido a que los horizontes serían en realidad volúmenes lenticulares subsuperficiales discontinuos, ejemplificado con perfiles ubicados en distintas posiciones topográficas del microrrelieve. Un estudio detallado de la variabilidad espacial de los perfiles de un Vertisol, realizado en trincheras que abarcaban las distintas posiciones (microloma, microdepresión y posiciones intermedias), mostró las diferencias notables en las propiedades morfológicas, físicas y químicas entre ellos (Wilding et al., 2002). La gran variabilidad espacial de las propiedades superficiales y subsuperficiales de estos

Vertisoles mostró la importancia de la verificación de la misma en cortas distancias y llevó a proponer el replanteo de concepto de pedón (Wilding et al., 2002).

Durante mucho tiempo, se ha considerado que una característica distintiva de los Vertisoles es un alto grado de uniformidad de la mayoría de las propiedades en todos los perfiles, y particularmente una casi ausencia de diferenciación textural debido a un proceso de haploidización por argilipidoturbación. Este proceso de mezcla inhibiría la horizontalización, lo que daría como resultado pedones cíclicos con perfiles A-C (Murphy et al., 1982; Blokhuis 1982). Aunque algunos estudios anteriores informaron de un aumento de arcilla con la profundidad en los Vertisoles (Dudal, 1965), se consideró que estas variaciones en el contenido de arcilla no se debían a la migración de la arcilla sino a la herencia del material original (Ahmad, 1983).

A diferencia de la mayoría de los Vertisoles en el mundo, gran parte de los Vertisoles en la región mesopotámica argentina presentan horizontes que se describen como un Bt argílico, teniendo en cuenta el notable aumento del contenido en arcilla en comparación con el horizonte suprayacente, y la existencia de recubrimientos arcillosos en grietas y poros del horizonte B, y especialmente en los horizontes inferiores BC o C (Cumba et al., 2005; Bedendo, 2019).

La pedogénesis de los Vertisoles de la Pampa Mesopotámica parte de los sedimentos de limos calcáreos lacustres antes mencionados. Estos sedimentos conforman una unidad estratigráfica denominada Formación Hernandarias, depositada por el río Uruguay en ambientes lacustres y palustres durante un período muy seco del Pleistoceno medio-bajo (Morrás et al., 2023). En la parte occidental de Entre Ríos y sobre la Formación Hernandarias existe un depósito de aproximadamente 2 m de espesor de sedimentos loésicos del Pleistoceno tardío denominado Formación Tezanos pintos, que

constituyen los materiales parentales de los suelos clasificados como Molisoles de la región (Morrás et al., 2023).

Hartley et al. (2014) interpretaron que en una primera etapa de pedogénesis en el material esmectítico de la Formación Hernandarias, los suelos habrían desarrollado características más intensamente vérticas, bajo la influencia de situaciones más contrastantes de humedecimiento y secado. En una etapa posterior, y como consecuencia del recubrimiento con sedimentos loésicos, el humedecimiento diferencial y el proceso de contracción-hinchazón del subsuelo se limitaron, debido al efecto amortiguador de la superficie limosa no expansiva.

En consecuencia, en una segunda etapa de pedogénesis, el proceso de translocación de arcilla se habría incrementado. Además, el porcentaje relativamente alto de sodio de intercambio en estos suelos facilitaría la dispersión y migración de las arcillas. Según lo observado, los rasgos de iluviación son escasos en la parte media de los horizontes B, lo que sería resultado de una mayor intensidad y frecuencia de humedecimiento y secado y una argiliturbación más intensa en ese nivel, produciendo la ruptura y la incorporación de recubrimiento en la masa fundamental.

Finalmente, los trabajos de Morrás et al. (2023) justificarían la designación del horizonte B del Vertisol aquí estudiado como horizonte Bt argílico, así como de su epipedón como mólico, y también justificarían los criterios y adaptaciones del sistema de clasificación que fueron desarrollados para el suelo por agrimensores de Entre Ríos, en la Región Pampeana.

En contraste con los estudios desarrollados en la Pampa Mesopotámica, en la Región Pampeana no existen estudios sistemáticos sobre la pedogénesis de los Vertisoles, si bien se menciona la variabilidad espacial de propiedades entre cresta y bajo de gilgai poco expresados en Entre Ríos (Morrás et al., 2023). Según trabajos publicados por el

INTA (1998) postula que dichas variaciones se deben tanto a movimientos en masa como a procesos de erosión, probablemente natural. Así, por ejemplo, se menciona la variabilidad en la presencia de concreciones calcáreas, las que se encuentran entre los horizontes superficiales y los 60 cm de profundidad (INTA, 1998).

La Región Pampeana de la Argentina es una gran llanura sedimentaria en cuya superficie se presentan loess primarios y secundarios depositados desde el Pleistoceno Temprano hasta el Holoceno Medio y Reciente (Zárate, 2005). Tanto el origen como la composición de estos sedimentos loésicos son todavía temas controvertidos. Existe consenso en que las principales áreas de origen para la mayor parte de los depósitos son las rocas andesíticas y basálticas del norte de la Patagonia y la Cordillera de los Andes (Teruggi 1957). Varios autores (Zárate & Blasi 1993; Iriondo 1990; Iriondo & Kröhling 1996) propusieron además la existencia de una primera etapa de transporte fluvial de sedimentos que posteriormente fueron deflacionados a partir de los depósitos de llanuras aluviales que bordean la Región Pampeana. En cualquier caso, el transporte eólico promovió la clasificación granulométrica de los sedimentos, lo que resultó en una disminución del tamaño del grano desde el sudoeste al noreste de la Región Pampeana. Siguiendo este criterio de una fuente principal de aportes andinos, se ha considerado generalmente que los sedimentos pampeanos son mineralógicamente homogéneos, a excepción de los contenidos variables de vidrio volcánico (Fidalgo et al., 1975; Imbellone & Teruggi, 1993; Sayago et al., 2001). Varios autores (González Bonorino, 1965,1966; Scoppa, 1976; Camilión, 1993; Iriondo & Kröhling, 1996) han informado que el mineral de arcilla dominante en los sedimentos y suelos superficiales de la Región Pampeana es illita, lo que también sería el caso de los sedimentos y suelos en la región del Chaco.

La Pampa Ondulada es una de las subregiones de la llanura pampeana, hacia el NE de la misma, constituida por una franja de unos 100 km de ancho que bordea los ríos Paraná y del Plata.

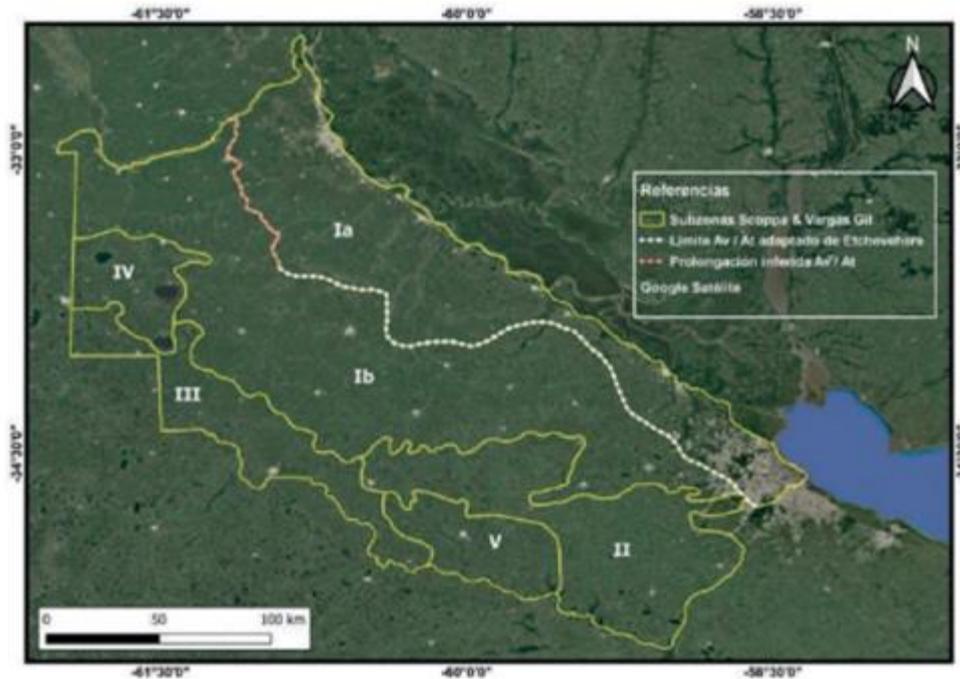


Figura 2- Mapa de la sub-zonas geo-edafológicas en la Pampa Ondulada. Líneas continuas en amarillo: sub-zonas geomorfológicas de acuerdo a Scoppa & Vargas Gil (1969). Línea punteada blanca: límite entre asociaciones dominantes de suelos vértico (Ia) y típicos (Ib) de acuerdo a Etchevehere (1975). Línea punteada rosa: prolongación inferida en la provincia de Santa Fé del límite entre subgrupos de suelos vérticos y típicos basa en la información del Atlas de Suelos de la República Argentina. (Morrás et al., 2022)

Esta constituye el sector más importante de la Pampa desde el punto de vista de la producción agrícola, tanto por la calidad de sus suelos como por sus condiciones climáticas favorables, de tipo templado-húmedo. Estudios granulométricos de los sedimentos loésicos superficiales de esta subregión pusieron en evidencia un incremento de la fracción arcilla en los sedimentos más próximos al eje fluvial río Paraná-río de la Plata (Iñiguez & Scoppa, 1970; Morrás & Cruzate, 2000). En este sector, los Argiudoles

vérticos son dominantes, particularmente en los interfluvios y sectores altos de las pendientes. Por el contrario, en los niveles intermedios de este sector y en el resto de la Pampa Ondulada, los Argiudoles típicos son los suelos zonales característicos.

En relación con la mineralogía, Iñiguez & Scoppa (1970) y Scoppa (1974) identificaron variaciones mineralógicas de la arcilla con un incremento progresivo de esmectitas hacia el río Paraná. Dado que los autores asumieron un origen común y una composición homogénea del material parental, consideraron que los cambios mineralógicos solo podían explicarse por el proceso de meteorización, y que el mayor contenido de esmectita en los suelos vérticos ubicados hacia el NE sería el resultado de una neoformación más intensa en materiales parentales de un tamaño de grano más fino. Sin embargo, estos autores no proporcionaron una explicación sobre la yuxtaposición de Argiudoles vérticos y típicos en este sector vecino al eje fluvial.

A pesar de estos conceptos tradicionales sobre el origen y composición de los loess y suelos pampeanos, otros estudios sobre la mineralogía de las fracciones arena y limo de los sedimentos y de los suelos del norte de la Pampa y el sur del Chaco revelaron, además de los componentes de origen andino, evidentes contribuciones de las Sierras Pampeanas del centro de la Argentina. También, fueron identificadas contribuciones desde la cuenca del río Paraná en el sector oriental de la Pampa y del Chaco (González Bonorino, 1965, 1966; Morrás & Delaune, 1985; Morrás, 2003; Etchichury & Tofalo, 2004). Estudios geoquímicos de fósforo y potasio en la masa total y en fracciones granulométricas específicas de suelos y sedimentos superficiales, permitieron diferenciar diversas áreas en la Pampa y en el sur del Chaco sobre la base de los contenidos diferenciales de estos elementos. Todos estos resultados permiten inferir que en la Pampa y en el Chaco han convergido sedimentos de los Andes, de las Sierras Pampeanas y de la

cuenca del Paraná, además de aportes locales de las Sierras pampeanas de Ventania y Tandilia (Morrás, 1996; 1999; Morrás & Cruzate, 2002).

También, a pesar de las interpretaciones que adjudican un origen pedogenético a la arcilla esmectita en los materiales superficiales del NE de la Pampa Ondulada, otros estudios mineralógicos de la fracción arcilla en suelos del norte de la Región Pampeana (Stephan et al. 1977) y del sur del Chaco (Morrás et al. 1980, 1982; 2017) constataron un incremento progresivo de esmectita hacia el este de la región que puede estar relacionado con las contribuciones minerales de la cuenca de Paraná. También, en la parte más oriental de la Región Pampeana llamada Pampa Mesopotámica, se han desarrollado Vertisoles en sedimentos lacustres del Cuaternario temprano ricos en esmectitas (González Bonorino 1966; Iriondo 1994; Morrás et al. 1993; Durán et al. 2011; Morrás, 2018). Los sedimentos fluviales y los suelos presentes en el valle del río Paraná (Morrás, 1998) y en los sedimentos estuáricos holocénicos y suelos en la costa de Río de la Plata (González Bonorino 1966; Imbellone et al. 2010), son también ricos en esmectitas.

Así, el paradigma tradicional de “unicidad y uniformidad” sobre los depósitos de loess como base sobre la cual se asientan la mayoría de las investigaciones sobre suelos de la Región Pampeana, parece ser insuficiente para explicar algunos aspectos de la génesis y distribución de suelos de dicha región, particularmente en el marco de nuevos estudios que revelan una composición mineralógica heterogénea en las planicies de la llanura Chaco-Pampeana (Morrás 1997; 2003; Zárate 2003; Durán et al. 2011). En esta perspectiva, y a partir de estudios muy detallados en una pequeña cuenca de la Pampa Ondulada, Morrás & Moretti (2016) concluyen que la franja con Argiudoles vérticos dominantes y algunos Vertisoles que bordea el eje fluvial Paraná-de la Plata, en vez de ser interpretada como una modificación pedogenética de materiales andinos del sudoeste, podría considerarse como el margen occidental de un área que incluye la Pampa

Mesopotámica y una gran parte de Uruguay donde los suelos vérticos se desarrollaron sobre sedimentos de arcilla esmectítica de varias fuentes encontradas en la cuenca del Paraná.

Por otro lado, estudios recientes sobre diversas propiedades físicas, químicas y mineralógicas de Argiudoles típicos y vérticos de la Pampa Ondulada pusieron de relieve en algunos casos ciertas inconsistencias respecto a su clasificación taxonómica (Bressan et al., 2012, 2014). La expansión y contracción de las arcillas son responsables de los procesos de estructuración abióticos, y eventualmente, si la expansión es importante, de la generación de rasgos vérticos en los suelos. Este comportamiento vértico no sucede únicamente con la predominancia de minerales esmectíticos, dado que se puede generar a partir de la presencia de tan solo un 20 % de filosilicatos expandibles en la fracción arcilla del suelo (Imbellone et al., 2010).

Diversos tipos de criterios de campo y ensayos analíticos se emplean para evaluar la expansibilidad de los materiales de suelo. Para definir los subgrupos vérticos dentro de los Argiudoles, la Taxonomía de Suelos (USDA, 2010) ha considerado dos criterios alternativos, cada uno de ellos como suficiente: 1) grietas y caras de fricción o agregados en forma de cuña, y/o; 2) una extensibilidad lineal de 6,0 cm o más entre la superficie del suelo mineral y una profundidad de 100 cm. Sin embargo, Bressan (2013) y Bressan et al. (2014) observaron que algunos Argiudoles típicos de la Pampa Ondulada, cuya morfología no refleja condiciones vérticas, presentan valores elevados tanto de extensibilidad lineal como del índice plástico, que justificarían su clasificación dentro de un subgrupo vértico, y que no se diferencian o aún son mayores al de otros suelos sí clasificados como Argiudoles vérticos. En consecuencia, la extensibilidad lineal esta propiedad no pareciera ser un parámetro adecuado o suficiente para discriminar y

establecer la pertenencia de estos Argiudoles pampeanos a subgrupos típicos o vérticos (Bressan, 2013; Bressan et al., 2014).

En la Pampa Ondulada Alta, en la margen derecha del río Paraná, y en una franja de unos 60 km de ancho a lo largo del eje fluvial, la parte alta de las lomas presenta Argiudoles vérticos, mientras que en las pendientes los suelos dominantes son Argiudoles típicos, evidenciando una secuencia catenaria inversa a la usual en muchos ambientes. En esta franja se presentan sedimentos loésicos esmectíticos (asignables a la Formación Buenos Aires) que habrían sido eolizados de las llanuras aluviales del río Paraná, entre otras fuentes al este.

Estudios recientes han puesto de manifiesto la propuesta de un nuevo modelo pedoedafológico para comprender la génesis y las propiedades de los suelos con características vérticas de la región de la Pampa Ondulada (Morrás et al., 2023). Este modelo pone en evidencia la existencia de estructuras diapíricas en este material encontrado en la Pampa Ondulada, lo que sugiere que, al igual que en la Pampa Mesopotámica, los Vertisoles también habrían sido aquí los suelos dominantes durante un período prolongado en el Pleistoceno. Posteriormente, en el Pleistoceno Superior el paisaje fue cubierto por un manto de loess illítico relativamente profundo, originado en fuentes del oeste. Luego, a largo de los períodos húmedos del Holoceno, las crestas y tramos superiores de las pendientes fueron parcialmente erosionadas. A diferencia de lo ocurrido en la Pampa Mesopotámica y de la Pampa Ondulada Baja, debido al mayor espesor del sedimento loésico superficial los Vertisoles de la Pampa Ondulada Alta quedaron como paleosuelos enterrados. Como resultado, en la parte superior del relieve se encuentra hoy una yuxtaposición de suelos vérticos con diferentes características y profundidades del solum. Sus propiedades, que corresponderían a las de suelos poligénicos, serían dependientes del sector (“bajo” o “cresta”) del Vertisol “oculto” en el

que se hayan desarrollado. El objetivo de esta tesis doctoral es seguir encontrando evidencias para poder ratificar la propuesta de este nuevo modelo geoedafológico para los suelos de la Pampa ondulada.

2. HIPÓTESIS

Hipótesis

- **H1-** *Los Vertisoles eran los suelos dominantes en la Pampa Ondulada durante el Pleistoceno, pero luego fueron recubiertos por un sedimento loésico, quedando enterrados.*
- **H2-** *Los suelos vérticos de la Pampa Ondulada son suelos poligenéticos.*
- **H3-** *Los Argiudoles vérticos de la Pampa Ondulada fueron clasificados como tales y fueron muestreados sin considerar la presencia de los sectores “cresta” o “bajo” presentes en los Vertisoles enterrados.*

3. OBJETIVOS

Teniendo en cuenta los conceptos desarrollados con anterioridad, el objetivo de este trabajo es:

3.1-Objetivo principal:

Desarrollar un modelo geoedafológico que explique la génesis y propiedades físicas de los Vertisoles y suelos vérticos del NE de la Región Pampeana de la Argentina, evaluando criterios analíticos adecuados para su clasificación taxonómica.

3.2-Objetivos específicos:

- a-. Determinar la composición mineralógica de la fracción fina y de la fracción magnética de Vertisoles y suelos vérticos seleccionados del noreste de la Región Pampeana.
- b-. Establecer la relación existente entre la composición mineralógica y las propiedades morfológicas, físicas y físico-químicas de los Vertisoles y suelos vérticos seleccionados.
- c-. Estudiar la relación existente entre los materiales parentales, la distribución geográfica y los procesos de génesis de Vertisoles y suelos vérticos del noreste de la Región Pampeana.
- d-. Evaluar parámetros físicos y físico-químicos para la caracterización y clasificación apropiada de los suelos con propiedades vérticas de la Pampa Ondulada.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Caracterización de los perfiles estudiados

La localización aproximada de los perfiles a estudiar se representa en la Figura 3, y en la Figura 4 se observan las unidades taxonómicas dominantes

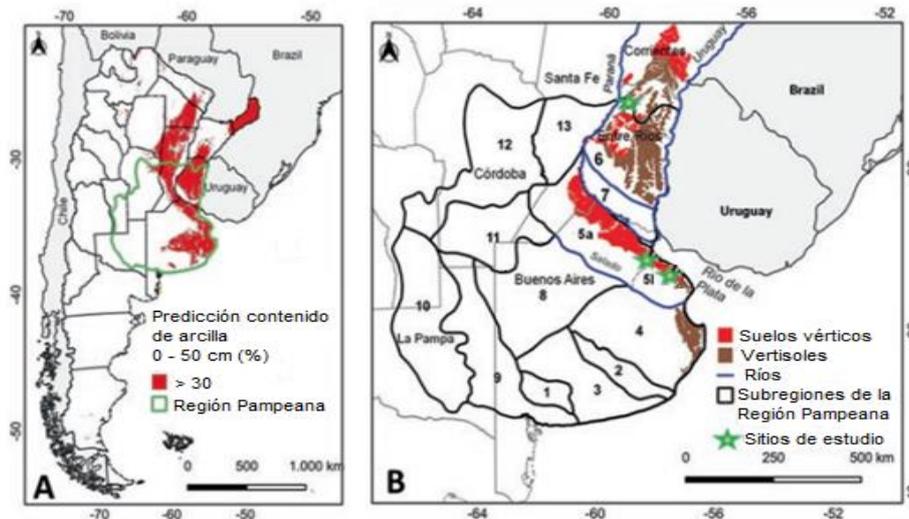


Figura 3- Mapa de la Región Pampeana con sus subregiones y la localización de los perfiles estudiados (adaptado de Morrás et al., 2023).

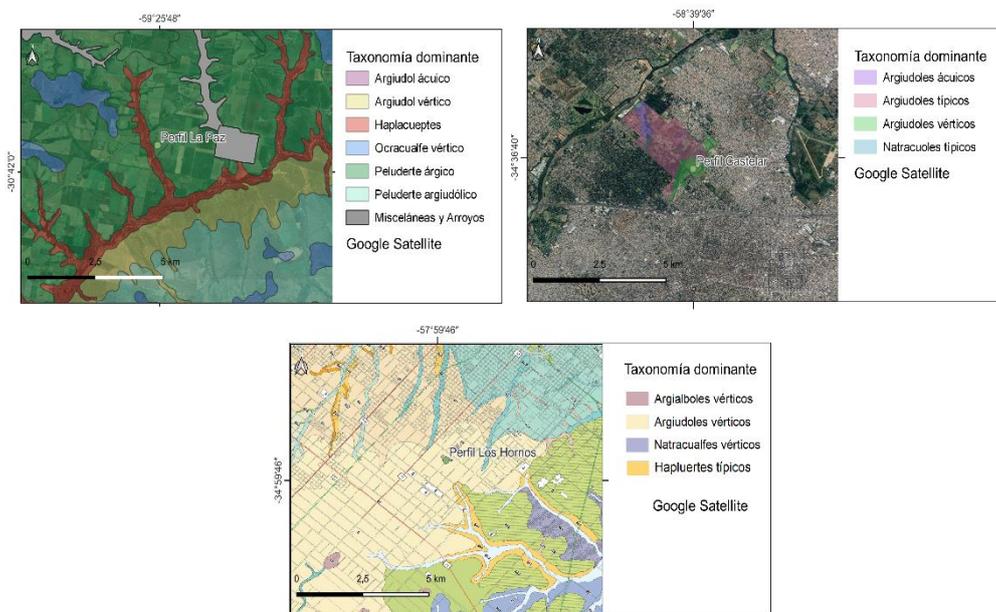


Figura 4- Mapas de unidades taxonómicas dominantes con la localización de los tres perfiles estudiados (adaptado de Gomez, 1993; Hurtado et al., 2006; y Tasi, 2009).

Para alcanzar estos objetivos se seleccionaron tres perfiles de suelos con propiedades vérticas del noreste de la Región Pampeana de Argentina; uno de ellos clasificado por la Taxonomía de Suelos como un Vertisol (Hapludert típico) localizado en las cercanías de la ciudad de La Paz ($30^{\circ}41'26.582''S$ $59^{\circ}25'57.94''O$), en la Provincia de Entre Ríos, ubicado en la Pampa Mesopotámica (Figuras 3 y 4). Según el mapa de suelos de la Provincia de Entre Ríos (INTA, 1990), este suelo correspondería a la Serie San Gustavo, perteneciente a la familia fina, neutra, térmica de los Peludertes árgicos (Vertisol con gilgai y Bt). Este suelo muestra un microrelieve gilgai lineal bien desarrollado, ciclos de 5-7 metros, y altibajos de hasta 30 cm. Es negro hasta los 70-90 cm en el bajo del gilgai, y desde 0-15 cm en la cresta. Está ligeramente erosionado y moderadamente bien drenado. En el bajo del gilgai tiene un epipedón franco arcillo limoso bien estructurado y un horizonte Bt argílico, arcillo limoso. Las concreciones de carbonatos aparecen entre los 50 y 70 cm, en el bajo del gilgai, y desde la superficie, en la cresta. Son suelos desarrollados en materiales lacustres (“limos calcáreos”) arcillo-limosos. Se encuentra en un paisaje de periplanicies onduladas, con pendientes relativamente cortas, que varían entre 1,5 y 3 %. Este Vertisol se usó como referencia en cuanto a sus características composicionales y propiedades de comportamiento de este tipo de suelos.

La zona donde se ubica el perfil estudiado de la Provincia de Entre Ríos presenta precipitaciones medias anuales que varían entre 1200 y 1300 mm, con mayor incidencia en los meses de verano y menor en el invierno, en tanto que la temperatura media anual varía entre 17 y 20 °C. Según la Taxonomía de Suelos (USDA, 2010), el régimen de humedad de la zona es údico, y el de temperatura, térmico (Van Wambeke & Scoppa, 1976).

Los dos restantes suelos, ambos clasificados como Argiudoles vérticos, están ubicados en la Provincia de Buenos Aires (Figuras 3 y 4): uno se sitúa en las cercanías de Castelar ($34^{\circ} 36' 54.44'' S$ $58^{\circ} 39' 36.64'' O$), Partido de Hurlingham, y el otro en las cercanías de Los Hornos ($34^{\circ}59'18.27''S$ $57^{\circ}59'33.19''O$), Partido de La Plata. Según la carta de suelos del INTA Castelar (Gómez, 1993), el suelo de Hurlingham correspondería a la Serie Hurlingham perteneciente a la familia fina, illítica, térmica de los Argiudoles vérticos (Molisoles). Está ubicado en la posición de loma en áreas muy suavemente onduladas. Es un suelo con escurrimiento medio, con permeabilidad moderadamente lenta, y moderadamente bien drenado. Por su parte, el suelo de Los Hornos fue descrito por Hurtado et al. (2006) como la serie Estancia Chica perteneciente a la familia fina, illítica, térmica de los Argiudoles vérticos (Molisoles) ubicada en su mayor parte en el inferfluvio que separa vertientes del río Samborombón y del Río de la Plata (principalmente en las divisorias correspondientes a las cuencas de los arroyos Pereyra-San Juan, Carnaval-Martin, Rodriguez-Don Carlos y de Gato-Perez-Regimiento). Se trata de un área plana a muy suavemente ondulada con intercalaciones de áreas plano-cóncavas, depresiones amplias y cubetas. Dichos suelos aparecen en las partes más elevadas de la unidad cartográfica Estancia Chica y presentan arcillas expandibles.

La zona de los perfiles estudiados de la Provincia de Buenos Aires presenta precipitaciones medias anuales que varían entre 900 y 1100 mm, con mayor incidencia en los meses de verano y menor en el invierno, en tanto la temperatura media anual varía entre 14 y 17 °C. Desde el punto de vista de la Taxonomía de Suelos (USDA, 2010), las dos zonas donde se encuentran los perfiles estudiados tienen también un régimen de humedad údico y un régimen de temperatura térmico (Van Wambeke & Scoppa, 1976).

4.2 Descripción de los suelos estudiados

En los tres perfiles seleccionados se encontró estructura diapírica, observándose claramente dos sectores: bajo y cresta.

A continuación, se presenta la descripción de campo efectuada de cada uno de los perfiles estudiados según las normas del "Libro de Campaña para la descripción y muestro de suelos" (Schoeneberger et al., 2002).



Figura 5- Bajo y cresta del perfil de suelo descrito en las proximidades de La Paz (Provincia de Entre Ríos).

Bajo Peludert árgico (La Paz)

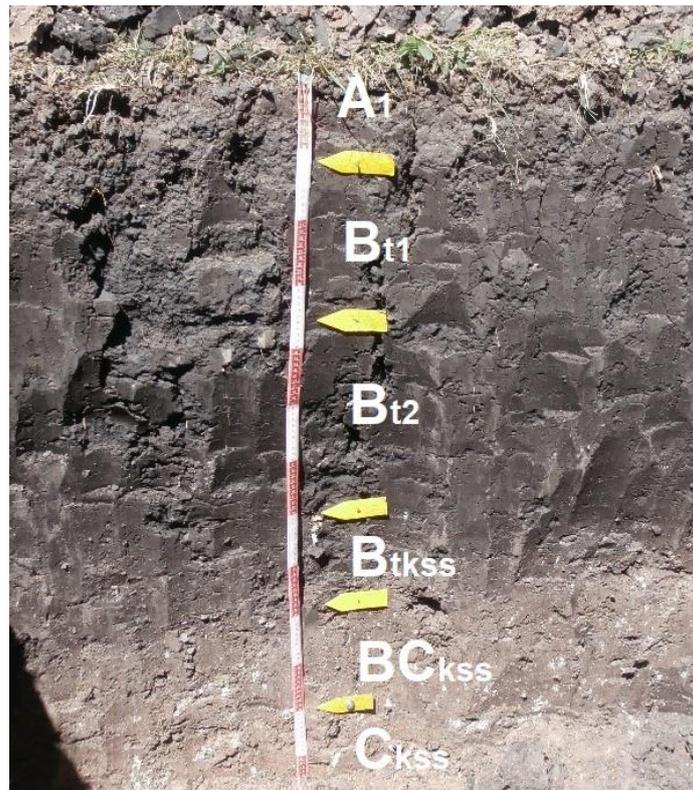


Figura 6- Bajo del perfil de suelo descrito en las proximidades de La Paz (Provincia de Entre Ríos).

BAJO

A₁ **0-12 cm.** Color 10YR 2/2 (en húmedo). Bloques subangulares a angulares medios (diam. medio 20 mm) y subangulares gruesos (20-30 mm). Grietas existentes pero cerradas, que continúan y se expresan en B_{t1}. Raíces frecuentes

B_{t1} **12-36 cm.** Color 10YR 1,7/1 – 5YR 1,7/1 (en húmedo). Prismas gruesos (tamaño aprox. 120 x 50 mm) que rompen en bloques gruesos subangulares con tendencia a angulares. Superficie de los agregados de

aspecto rugoso. Barnices ocasionales que se presentan sobre todo en caras horizontales de los agregados. Slickensides pequeños, ocasionales. Horizonte con máxima expresión de grietas, de 1-2 cm de ancho, comunes, separadas en general unos 20 -30 cm entre sí, que llegan a 50 o 70 cm de profundidad. Raíces frecuentes.

Bt₂ **36-71 cm.** Color 7,5 YR 2/1 (en húmedo). Prismas grandes, con caras rugosas, que rompen en bloques subangulares grandes (diam. aprox., 8 cm) irregulares. Barnices raros, de unos 2 cm. Grietas de 1-2 cm de ancho, comunes, que llegan a 50 o 70 cm de profundidad Raíces comunes.

Btkss **71-88 cm.** Color 10 YR 2/1-2/2 (en húmedo). Bloques gruesos (de unos 4 cm de diam.) subangulares a angulares, de superficie rugosa. Slickensides de unos 2-3 cm. Nódulos pequeños de carbonato de calcio, diámetro 2-3 mm, blandos, ocasionales. Raíces ocasionales; algunas raíces, finas, aplastadas en fisuras.

BCkss **88-109 cm.** Color 10 YR 3/3 (en húmedo). Bloques irregulares, grandes (diám. aprox., 3 cm). Nódulos de carbonato de calcio, diámetro medio 1 cm, irregulares. Slickensides enormes (tamaño aprox. 10 cm), superpuestos.

Ckss **109-126+ cm (piso).** Color 10 YR 4/4 (en húmedo). Bloques subangulares gruesos (diámetro 2-3 cm). Slickensides pequeños, comunes y slickensides

muy grandes (de unos 5 cm) superpuestos. Nódulos de carbonato de calcio, de tamaño variado, entre 2 y 10 mm, irregulares. Cristales de yeso, ocasionales.

Cresta Peludert árgico (La Paz)

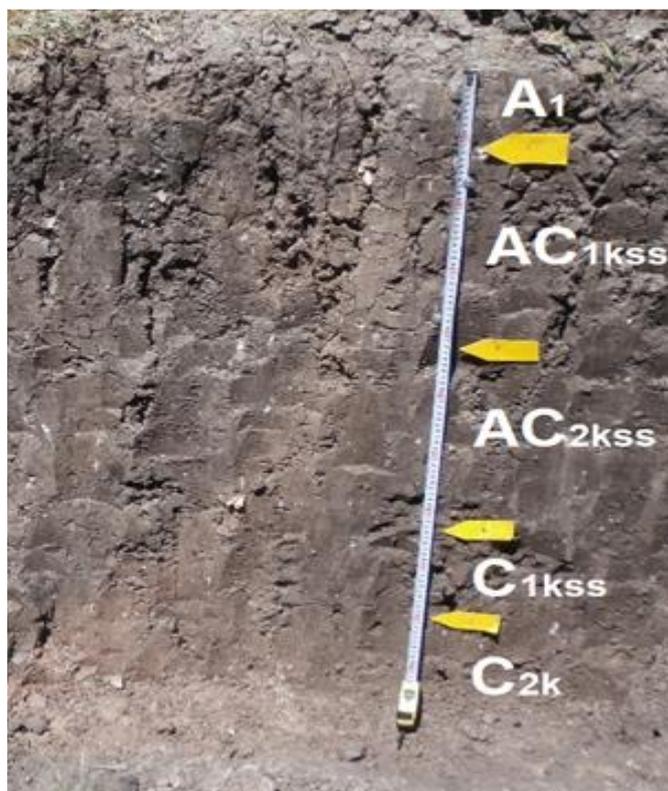


Figura 7- Cresta del perfil de suelo descrito en las proximidades de La Paz (Provincia de Entre Ríos).

CRESTA

A₁ **0-12 cm.** Color 10YR 2/2 (en húmedo). Bloques subangulares, muy irregulares, gruesos (20-30 mm). Grietas existentes pero cerradas, que continúan y se expresan en AC₁. Raíces frecuentes.

AC₁kss **12-42 cm.** Color 10 YR 2/2 (en húmedo). Bloques subangulares irregulares con tendencia a redondeados, moderados. Horizonte con máxima expresión de grietas, de 1-2 cm de ancho, comunes, separadas en general unos 20 cm o menos entre sí (la separación es menor que en el bajo). Algunas grietas se relacionan entre si en diagonal, generando estructuras grandes en cuña. Slickensides grandes (de unos 3 cm) comunes. Nódulos de Fe-Mn, de 1-2 mm de diámetro. Nódulos de carbonato de calcio, de aprox. 1 cm de diam., redondeados, comunes; también nódulos pequeños de 1-2 mm. Raíces escasas.

AC₂kss **42-73 cm.** Color 10 YR 2/3 (en húmedo). Slickensides medianos, comunes. Nódulos de carbonato de calcio similares al horizonte AC₁kss. Raíces ocasionales.

C₁kss **73-91 cm.** Color 10YR 3/2 (en húmedo). Bloques subangulares grandes (diámetro medio 3 cm). Slickensides medianos y pequeños, comunes. Nódulos de carbonato de calcio similares a AC₁kss. Raíces ocasionales.

C₂k **91 – 106+ cm (piso).** Color 10YR3/3 (en húmedo). Nódulos de carbonato de calcio similares a AC₁kss.

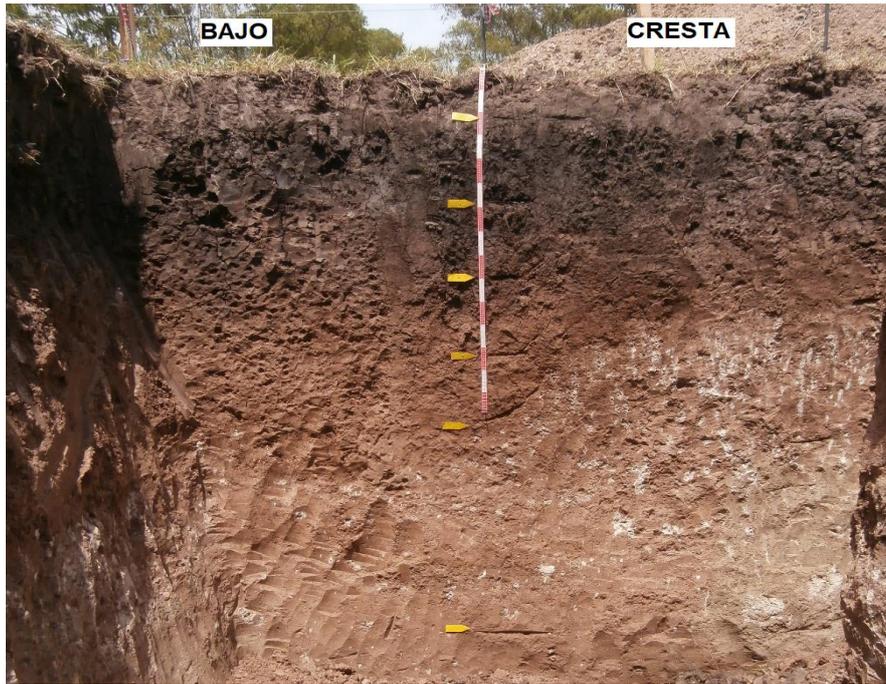


Figura 8- Bajo y cresta del perfil de suelo descrito en las proximidades de Castelar (Provincia de Buenos Aires).

Bajo Argiudol vértico (Castelar)

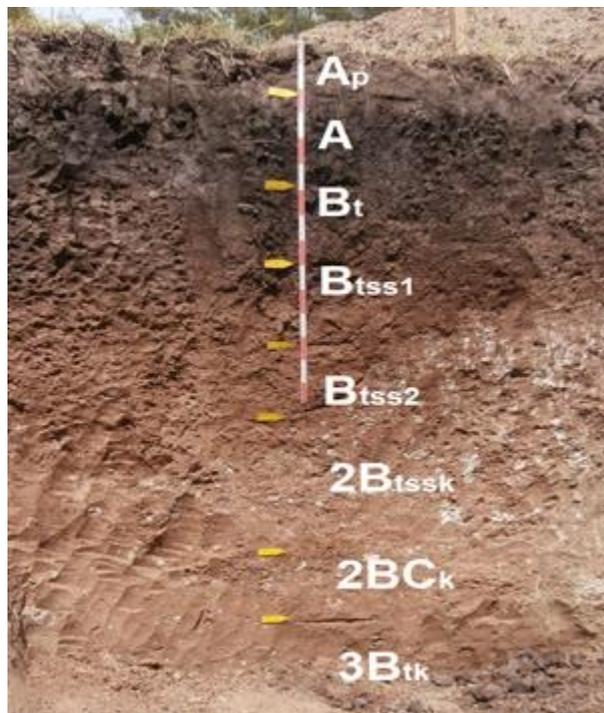


Figura 9- Bajo del perfil de suelo descrito en las proximidades de Castelar (Provincia de Buenos Aires).

BAJO

Ap 0-18 cm. Color 10YR 3/2 (en húmedo). Bloques angulares medios moderados que rompe a granular; duro en seco; friable en húmedo; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo en mojado; raíces abundantes; límite claro, suave.

A **18-26 cm.** Color 10YR 3/2 (en húmedo). Bloques angulares medios moderados; duro en seco; friable en húmedo; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo en mojado; raíces abundantes; límite claro, suave.

Bt **26-57 cm.** Color 10YR 3/1 (en húmedo). Prismas gruesos que rompen a bloques angulares medios fuertes; muy duro en seco; friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; barnices muy abundantes; se observan chorreaduras de materia orgánica; raíces comunes; límite claro, ondulado.

Btss₁ **57-82 cm.** Color 7.5YR 3/2 (en húmedo). Prismas gruesos que rompen a bloques angulares medios fuertes, algunos de ellos de morfología cuneiforme; muy duro en seco; friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; barnices muy abundantes; presencia de slickensides; raíces comunes; límite claro, ondulado.

Btss₂ **82-106 cm.** Color 7.5YR 3/4 (en húmedo). Prismas débiles que rompen a bloques angulares medios moderados, algunos de ellos de morfología cuneiforme; muy duro en seco; friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; débil reacción de los carbonatos libres en la masa en la base del

horizonte; barnices muy abundantes; presencia de slickensides; raíces escasas; límite claro, ondulado.

2Btssk **106-145 cm.** Color 7.5YR 4/4 (en húmedo). Prismas débiles que rompen a bloques angulares medios moderados, algunos de ellos de morfología cuneiforme; duro en seco; friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; fuerte reacción de los carbonatos libres en la masa; presencia de concreciones calcáreas y de rizoconcreciones de 20 mm de diámetro; barnices abundantes; presencia de slickensides; límite claro, ondulado.

2Bck **145-190 cm.** Color 7.5YR 5/4 (en húmedo). Bloques angulares medios débiles; duro en seco; muy friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; fuerte reacción de los carbonatos libres en la masa; presencia de concreciones calcáreas y de muñequitas de hasta 40 mm de largo y 20 mm de ancho; moteados ver; límite claro, ondulado.

3Btk **190-280 cm.** Color 2.5Y 4/2 (en húmedo). Bloques angulares medios débiles; ligeramente duro a blando en seco; muy friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; débil reacción de los carbonatos libres en la masa; presencia de concreciones calcáreas de diámetro; escasos barnices.

Cresta Argiudol vértico (Castelar)



Figura 10- Bajo del perfil de suelo descripto en las proximidades de Castelar (Provincia de Buenos Aires).

CRESTA

Ap **0-15 cm.** Color 10YR 3/2 (en húmedo). Bloques subangulares medios moderados; ligeramente duro en seco; friable en húmedo; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo en mojado; raíces abundantes; límite claro, suave.

- A** **15-22 cm.** Color 10YR 3/2 (en húmedo). Bloques angulares medios moderados; duro en seco; friable en húmedo; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo en mojado; raíces comunes; límite claro, suave.
- Bt** **22-57 cm.** Color 10YR 3/1 (en húmedo). Bloques angulares medios fuertes; muy duro en seco; friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; barnices abundantes; raíces comunes; límite claro, ondulado.
- Btss₁** **57-80 cm.** Color 7.5YR 3/2 (en húmedo). Prismas medios que rompen a bloques angulares medios moderados, algunos de ellos de morfología cuneiforme; muy duro en seco; friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; barnices muy abundantes; presencia de slickensides; raíces comunes; límite claro, ondulado.
- Btss₂** **80-120 cm.** Color 7.5YR 4/4 (en húmedo). Prismas medios que rompen a bloques angulares medios moderados, algunos de ellos de morfología cuneiforme; muy duro en seco; friable en húmedo; plástico y adhesivo en mojado; débil reacción de los carbonatos libres en la masa en la base del horizonte; barnices muy abundantes; presencia de slickensides; raíces escasas; límite claro, ondulado.
- 2Btk₁** **120-150 cm.** Color 7.5YR 4/4 (en húmedo). Bloques angulares medios débiles; ligeramente duro en seco; friable en húmedo; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo en mojado; fuerte reacción de los carbonatos libres en

la masa; presencia de concreciones calcáreas; raíces escasas; límite claro, ondulado.

2Btk₂ 150-248 cm. Color 7.5YR 5/4 (en húmedo). Prismas débiles que rompen a bloques angulares débiles; friable en húmedo; ligeramente plástico y ligeramente adhesivo en mojado; débil reacción de los carbonatos libres en la masa; presencia de concreciones calcáreas; escasos barnices; moteados.

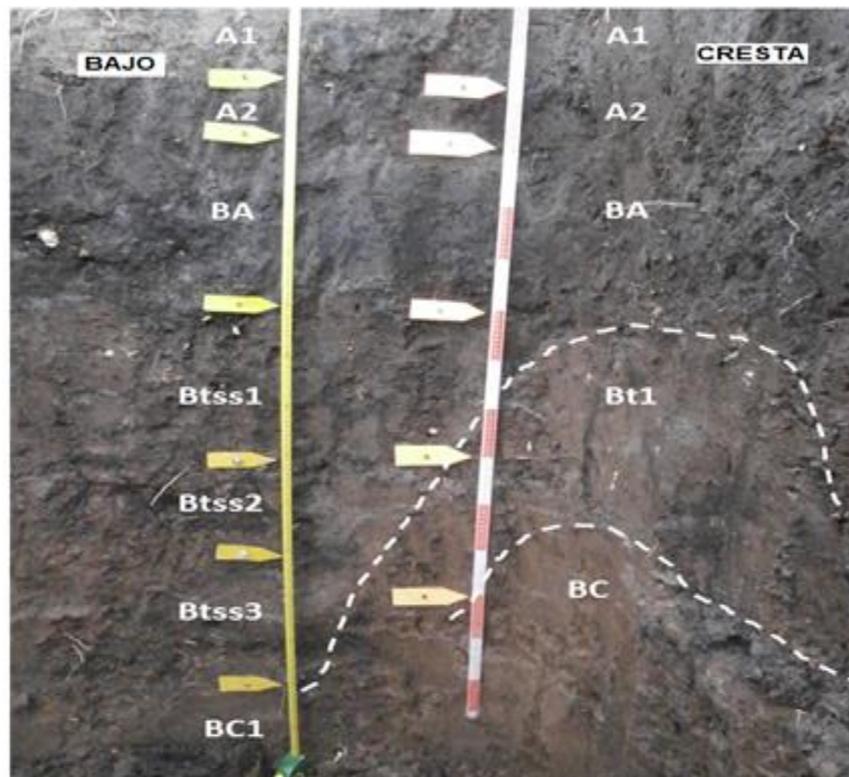


Figura 11- Bajo y cresta del perfil de suelo descrito en las proximidades de Los Hornos (Pcia. de Buenos Aires)

Bajo Argiudol vértico (Los Hornos)

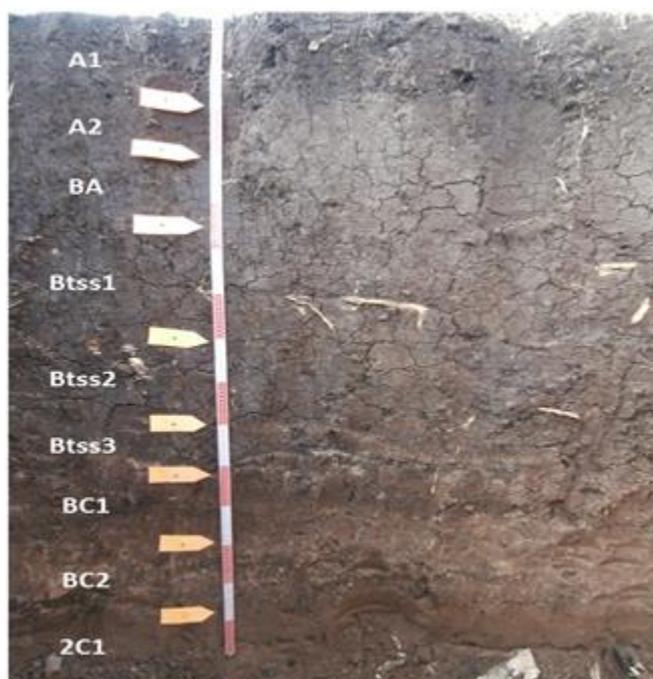


Figura 12- Cresta del perfil de suelo descrito en las proximidades de Los Hornos (Provincia de Buenos Aires).

BAJO

- A₁** **0 -19 cm.** Color 10YR2/3 (en húmedo). Bloques subangulares gruesos (2-3 cm de diámetro), fuerte, que rompen en bloques medianos. Friable en húmedo, muy duro en seco. Raíces muy frecuentes, finas y medianas, de diámetro que varía entre 1-4 mm; algunas lombrices. Límite claro, plano
- A₂** **19-30 cm.** Color 10YR 2/2 (en húmedo). Bloques subangulares gruesos (4-5 cm de diámetro). Consistencia firme en húmedo. Raíces frecuentes (algo menos que en A₁); lombrices. Límite claro, plano
- BA** **30-46 cm.** Color 10YR 2/2 (en húmedo). Prismas medianos, moderado, que rompen en bloques angulares gruesos (tamaño 2 x 3 cm). Muy duro en seco.

Barnices, sobre todo en cara superior de los agregados. Raíces comunes y raicillas aplastadas en las caras de los agregados; lombrices. Límite claro, suavemente ondulado

Btss₁ 46-70 cm. Color 10YR 2/3 (en húmedo). Bloques angulares gruesos (3-5 cm de diámetro), fuertes, que rompen en bloques medianos. También se aprecian algunos prismas medianos. Muy duro en seco. Barnices, comunes. Caras de deslizamiento ocasionales. Muy duro en seco. Límite claro, suavemente ondulado

Btss₂ 70-90 cm. Color 7.5YR 3/3 (en húmedo). Bloques angulares gruesos (3 cm de alto x 5 de ancho), fuerte. Barnices arcillo-húmicos frecuentes. Caras de deslizamiento ocasionales. Muy duro en seco. Raíces comunes; muchas raicillas aplastadas en fisuras. Límite claro, suavemente ondulado

Btss₃ 90-102 cm. Color 7.5YR 3/4 (en húmedo) Bloques angulares grandes (3-5 cm de diámetro), que rompen fácilmente en bloques angulares medianos (1-2 cm). Barnices arcillo-húmicos comunes. Caras de deslizamiento ocasionales. La matriz es más clara que los horizontes superiores, el material es moteado, transicional hacia los horizontes inferiores. Raíces abundantes. Límite del horizonte ondulado.

BC₁ 102-120 cm. Color 5YR 3/4 (en húmedo). Bloques subangulares, gruesos, irregulares. Barnices finos, comunes. Moteados oscuros de materia orgánica humificada. Raíces comunes a ocasionales. Límite ondulado.

- BC₂** 120-138 cm. Color 5YR 4/6 (en húmedo). Bloques débiles a masivo. Moteados oscuros de materia orgánica humificada, abundantes, con disposición preferentemente horizontal, particularmente en el contacto con el horizonte subyacente. Límite abrupto, plano.
- 2Ck** 138-150+ cm. Color 5YR 3/4 (en húmedo). Masivo. Nódulos de CO₃Ca, esferoidales, de 1.5-2 cm de diámetro. Nodulitos de Mn, raros.

Cresta Argiudol vértico (Los Hornos)

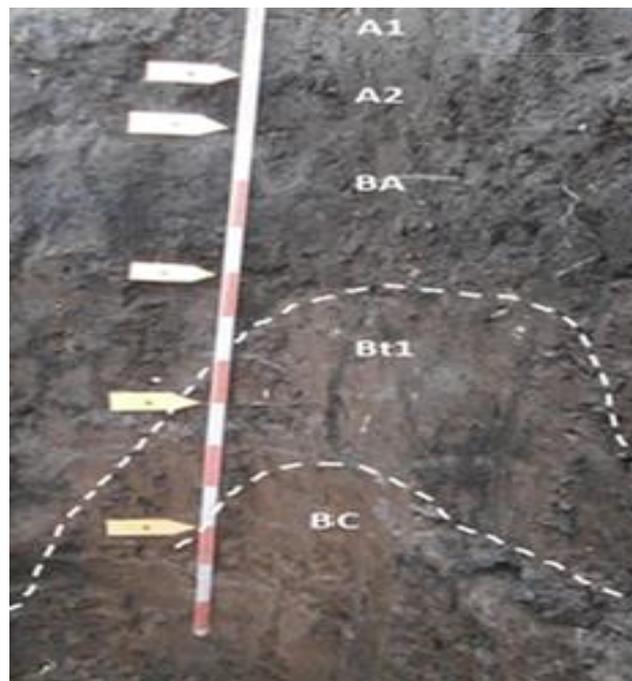


Figura 13- Cresta del perfil de suelo descripto en las proximidades de Los Hornos (Pcia. de Buenos Aires)

CRESTA

- A₁** 0 -18 cm. Color 10YR2/3 (en húmedo). Bloques subangulares gruesos (2-3 cm de diámetro), fuerte, que rompen en bloques medianos. Friable en húmedo, muy

duro en seco. Raíces muy frecuentes, finas y medianas, de diámetro que varía entre 1-4 mm; algunas lombrices. Límite claro, plano

A2 18-28 cm. Color 10YR 2/2 (en húmedo). Bloques subangulares gruesos (4-5 cm de diámetro). Consistencia firme en húmedo. Raíces frecuentes (algo menos que en A1); lombrices. Límite claro, plano

BA 28-60 cm. Color 10YR 2/2 (en húmedo). Prismas medianos, moderado, que rompen en bloques angulares gruesos (tamaño 2 x 3 cm). Muy duro en seco. Barnices, sobre todo en cara superior de los agregados. Raíces comunes y raicillas aplastadas en las caras de los agregados; lombrices. Límite claro, suavemente ondulado

Btss1 60-90 cm. Color 10YR 2/3 (en húmedo). Bloques angulares gruesos (3-5 cm de diámetro), fuertes, que rompen en bloques medianos. También se aprecian algunos prismas medianos. Muy duro en seco. Barnices, comunes. Caras de deslizamiento ocasionales. Muy duro en seco. Límite claro, suavemente ondulado

BC1 90-120 cm. Color 5YR 3/4 (en húmedo). Bloques subangulares, gruesos, irregulares. Barnices finos, comunes. R Moteados oscuros de materia orgánica humificada. Raíces comunes a ocasionales. Límite ondulado.

BC2 120+ cm. Color 5YR 4/6 (en húmedo). Bloques débiles a masivo Moteados oscuros de materia orgánica humificada, abundantes, con disposición

preferentemente horizontal, particularmente en el contacto con el horizonte subyacente. Límite abrupto, plano.

4.3 Determinaciones de Laboratorio

Se realizó un muestreo tomando muestras compuestas de suelo de cada uno de los distintos horizontes de la cresta y del bajo de los tres perfiles descriptos. Se las secó en estufa a 55 °C durante una semana y luego se las tamizó por un tamiz de 2 mm.

A cada una de estas muestras se le realizaron los siguientes análisis físicos, físico-químicos y mineralógicos:

Análisis Granulométrico:

Los análisis granulométricos de todos los horizontes de los tres perfiles estudiados se llevaron a cabo según el método de la pipeta de Robinson (Gee & Bauder, 1986). Las fracciones arcilla total (< 2 µm) y limo total (2-50 µm) fueron determinadas en suspensión de agua mediante la extracción de alícuotas con la pipeta de Robinson aplicando los principios de la ley de Stokes. La fracción arena fue obtenida por tamizado en seco, fraccionada en arena muy gruesa, gruesa, mediana, fina y muy fina según la escala del USDA.

Mineralogía de Arcillas:

Se tomaron 20 gramos de muestra total (<2000 µm) de cada horizonte y se le agregaron 10 ml de Peróxido de Hidrógeno al 30% para eliminar la materia orgánica, se lo trató 24 hs a temperatura ambiente y luego se lo calentó a 100 °C por 3 hs o hasta comprobar que ya no había reacción de materia orgánica. Luego se le agregaron 20 ml

hexametáfosfato de sodio (1 N), que actúa como dispersante, se lo llevó a un litro con agua destilada en probetas y se lo agitó manualmente durante 3 minutos. La fracción arcilla obtenida por sedimentación aplicando la Ley de Stokes fue saturada con MgCl (1 N) para obtener muestras homoiónicas. El análisis mineralógico de la fracción arcilla se realizó mediante difracción de rayos X con un equipo Panalytical X Pert Pro sobre muestras orientadas naturales, glicoladas y calcinadas a 550 ° C de cada uno de los horizontes de los perfiles estudiados.

La identificación de las arcillas se efectuó interpretando los espectros obtenidos para cada una de las muestras en cada uno de los tests aplicados. Una síntesis de los criterios utilizados se presenta en la Tabla N° 1.

Minerales	Naturales	Glicolados	Calcinados 200-300 °C	Calcinados 550 °C
Esmectitas	15-16 Å	16,8-20 Å	10 Å	10 Å
Vermiculitas	14-15 Å	14-16,5 Å	10 Å	10 Å
Cloritas	14-15 Å	14-15 Å	14-15 Å	14-15 Å
Illitas	9,5-10,3 Å	9,5-10,3 Å	9,5-10,3 Å	9,5-10,3 Å
Caolinitas	7-7,2 Å			
Interstratificados illita-vermiculita, illita-esmectita	10-16 Å	10-16 Å	9-10 Å	9-10 Å

Tabla 1- Espacio interfoliar en Å de reflexiones basales en pequeños ángulos (2°-15° 2θ/min).
Fuente: Robert, 1975; Brindley & Brown, 1980.

Susceptibilidad Magnética:

Se realizó el estudio de los minerales magnéticos a través de la susceptibilidad magnética a baja frecuencia, medida con un equipo Bartington MS2 con un sensor MS2B. Para este fin se tomaron muestras de cada perfil estudiado a intervalos de 10 cm de

profundidad. Las muestras se secaron en estufa a 55 °C durante una semana y luego se las tamizó por un tamiz de 2 mm. Se las peso en una balanza calibrada y se midieron en masa específica ($SI 10^{-8}m^3/kg$) en el susceptibilímetro a baja frecuencia. La frecuencia usada por el sensor MS2B es de 0.465 kHz (LF) y está calibrado para muestras de masa de 10 gramos.

Fuente: Operation Manual for *MS2* Magnetic Susceptibility System

Fósforo extractable:

Se determinó el contenido de fósforo extractable mediante la técnica de Bray & Kurtz (1945) tomando 2,5 gramos de muestra total (< 2000 μm) de cada horizonte y se le agregaron 20 ml de solución extractiva (solución mezcla de NH_4F 0,03N y HCl 0,025N). Luego se lo agito por 5 minutos e inmediatamente después se lo centrifuga para obtener un extracto limpio, se toman alícuotas y se lo deja en reposo para el desarrollo del color. Luego de 24 horas se leyó la absorbancia en un espectrofotómetro de 882 nm y se calculó la concentración de fósforo en la muestra según la siguiente ecuación:

$$P = \frac{M_p \times V_{ext} \times F}{m \times V_a}$$

P: es la concentración de fósforo en el suelo en microgramos de P por gramo de suelo (ppm)

M_p : es la masa de fósforo en la alícuota del extracto, obtenida mediante la curva analítica, en microgramos.

V_{ext} : es el volumen de la solución de extracción en mililitros

F: es el factor de dilución (cuando corresponda)

m: es la masa de la muestra de suelo en gramos

Va: es el volumen de la alícuota del extracto en mililitros

Carbono oxidable:

Se determinó el contenido de carbono oxidable mediante la técnica de Walkley – Black (1934) tomando 5 gramos de muestra total ($< 2000 \mu\text{m}$) de cada horizonte, se los trata con un volumen conocido de solución de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, que actúa como oxidante, en un medio fuertemente ácido (H_2SO_4 concentrado) en una proporción estipulada. El calor desprendido por la reacción del H_2SO_4 al diluirse favorece la acción del $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ oxidando la materia orgánica. El exceso de oxidante se determinó titulando con una solución de FeSO_4 de normalidad conocida, que actúa como reductor, hasta el viraje del color del indicador.

Materia orgánica:

Se determinó mediante la aplicación de un factor empírico de 1,724 considerando un contenido promedio del 58% de carbono en la materia orgánica del suelo (Read J. W & Ridgell R. H., 1921).

Entre las propiedades físico-químicas, se analizaron particularmente aquellas relacionadas con el complejo de cambio (CIC, bases de cambio, pH).

Capacidad de intercambio catiónico:

Se determinó la capacidad de intercambio catiónico del suelo total mediante saturación con acetato de amonio (Klute, 1986) tomando 2 gramos de muestra total (< 2000 μm) de cada horizonte y se los satura con acetato de amonio a pH 7. Luego se obtiene el extracto de suelo saturado con ion amonio y se lo satura con una solución concentrada de cloruro de sodio con lo cual el amonio adsorbido en el suelo es desplazado por el ion sodio y se recupera en el sobrenadante. Se cuantificó el ión amonio que fue desplazado del complejo de intercambio alcalinizando el extracto y el amonio se transformó en amoníaco, el cual es arrastrado por la corriente de vapor durante la destilación y es recogido en una solución de ácido bórico en exceso. Finalmente se tituló el borato de amonio formado con una solución de ácido valorado.

Determinación de cationes de cambio:

Se realizó la determinación de los cationes del complejo de intercambio del suelo total como un paso de la técnica para determinar CIC (Klute, 1986) mediante las técnicas habituales por absorción atómica y fotometría de llama. Se midió la emisión característica de un elemento introducido como vapor atómico dentro de la llama y esto se lo relacionó con patrones de concentración conocida determinando así la concentración en la muestra.

pH del suelo:

Se efectuaron las determinaciones de pH en agua (relación suelo:agua 1:2.5) tomando 2 gramos de muestra total (< 2000 μm) de cada horizonte y a las cuales se le añadieron 50 mil de agua destilada. La mezcla se la agitó durante tres minutos y luego se la dejó reposar por 15 minutos más. Finalizado este tiempo se procedió a medir el pH en el sobrenadante mediante la utilización de un pHmetro.

La caracterización física de los suelos se efectuó mediante diferentes técnicas para evaluar la porosidad, la retención de agua y la capacidad de expansión-contracción.

Agua de saturación

De acuerdo a la metodología de Richards (1949a) y Reitemeier & Fireman (1944), se utilizó el porcentaje de saturación de la pasta saturada preparada para medir conductividad eléctrica, con la finalidad de determinar el agua de saturación.

Humedad equivalente

Se pesaron 30 gramos de muestra tamizada a 2 mm. Se colocó la muestra en cajas metálicas especiales con papel de filtro y una malla para no perder material, dejándolos en agua durante 24 hs. Luego se dejó escurrir el exceso de agua por 20 minutos. Posteriormente se procedió a centrifugar la muestra por 40 minutos a una velocidad de 2400 rpm, para luego pesarla en húmedo. Por último, se la llevó a estufa a 105 ° C durante 24 hs, siendo luego pesada y obteniéndose el peso seco. De esta manera, con los pesos húmedo y seco se calcula el agua retenida y la humedad equivalente (Briggs & Mc Lane, 1907).

Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

Estas determinaciones se efectuaron sobre muestras no disturbadas para capacidad de campo y muestras tamizadas por 2 mm para el punto de marchitez permanente. A este efecto, en cada uno de los tres perfiles se tomaron cuatro muestras de suelo por horizonte con cilindros de 5 cm de diámetro, 3 cm de altura y 1-2 mm espesor. Para determinar la capacidad de campo (33 KPa) y el punto de marchitez permanente (1500 KPa) se utilizó

la determinación de retención de agua mediante la extracción por placas de presión (Richards, 1948).

Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente (p_b),

Se tomaron dos muestras con cilindro de 225 cm³ en cada uno de los horizontes de los suelos analizados. En el laboratorio, las muestras se pesaron y se pusieron a secar en estufa a 105°C, determinándose su peso seco. Con esta información se calculó la densidad aparente, al relacionar el peso seco del suelo con el volumen del cilindro utilizado (Blake & Hartge, 1986b).

Dap: peso suelo seco / volumen del cilindro

Porosidad total

La porosidad total (St) se determinó a partir de las densidades aparente y real (p_p) mediante la siguiente fórmula (Danielson & Sutherland, 1986):

$$St = (1 - p_b/p_p)$$

Como valor de densidad real se utilizó la densidad media del cuarzo, que es 2,65 g/cm³.

Distribución por tamaño de poro

Utilizando los resultados obtenidos en la determinación de las curvas de retención hídrica, se pudo establecer la distribución de poros por tamaño (Danielson & Sutherland, 1986). Teniendo en cuenta que los primeros poros en drenar son los más grandes, luego aquellos un poco más pequeños y así sucesivamente, se pudo estimar el rango de tamaño de poros involucrado en cada etapa, a partir de la presión negativa ejercida sobre la

muestra y aplicando la ecuación de capilaridad de Laplace (Bear, 1972). Conociendo el volumen de agua removida entre las distintas presiones aplicadas, se pudo determinar el volumen que ocupa cada categoría por tamaño de poros.

Una importante cuestión asociada con la caracterización de la distribución de tamaño de poros es la falta de una clasificación estándar en distintos intervalos de tamaño (Danielson & Sutherland, 1986). En el presente trabajo se adoptó la clasificación por tamaño de poros (Tabla 2) similar a la mencionada por Greenland (1977).

Tamaño de poro	Función desempeñada
Mayor a 50 μm	Poros de transmisión (Macroporos)
Entre 0,2 y 50 μm	Poros de retención de agua disponible (Mesoporos)
Menores a 0,2 μm	Poros de retención de agua no disponible (Microporos)

Tabla 2 - Clasificación de poros por tamaño y función (Greenland, 1977).

Teniendo en cuenta esta clasificación, se procedió a comparar el volumen ocupado por cada una de dichas fracciones en los distintos horizontes.

Coefficiente de extensividad lineal (COLE)

En el presente trabajo se determinaron las curvas de contracción de cada horizonte utilizando entre 30 y 40 agregados de 3 a 10 cm^3 de volumen, obtenidos del muestreo a campo. Estos agregados se humedecieron por capilaridad al ser colocados sobre un papel de filtro, alimentado a su vez con agua, mediante un algodón sumergido en agua destilada. Luego de 24 hs, los agregados fueron retirados del dispositivo y se dejaron secar al aire durante un tiempo variable, para obtener en ellos diferentes contenidos hídricos. Después

de este desecamiento parcial, y habiendo pesado los agregados para poder determinar su contenido de humedad, estos se colocaron en un recipiente con keroseno durante 24 hs.

Una vez saturados y sacados del recipiente, se retiró el exceso de líquido de la superficie con un papel absorbente, para eliminar la película superficial de keroseno y así evitar que esta sea contabilizada en los cálculos de volumen de los agregados. Posteriormente, y aplicando el principio de Arquímedes, se determinó su volumen, sumergiéndolos en un recipiente con keroseno dispuesto sobre una balanza. Por último, los agregados se secaron en estufa a 105 °C y se pesaron.

Los volúmenes obtenidos fueron utilizados para determinar el coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), el cual es un valor que marca la fracción de cambio en la dimensión de los agregados al pasar de un estado seco a otro húmedo. Puede ser usado para hacer inferencias acerca de la capacidad de un suelo a contraerse y expandirse, como de la mineralogía de las arcillas presentes en el mismo (USDA, 1996). Para su determinación se usó la siguiente ecuación (Grossman et al.,1968):

$$\text{COLE}_{\text{std}}: (V_{30}/V_d)^{1/3} - 1$$

siendo:

V_{30} : volumen ocupado por los agregados con un contenido de humedad correspondiente a un potencial mátrico de 30kPa

V_d : volumen ocupado por los agregados secados a estufa a 105°.

Se utilizó la clasificación del Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas et al. 2000) para categorizar a los materiales que componen los horizontes estudiados de acuerdo a su capacidad de expansión-contracción. Dichas categorías se detallan en la Tabla 3.

<i>Valoración del coeficiente de extensibilidad lineal</i>	
<i>Extensibilidad</i>	<i>Cole (cm /cm)</i>
Baja (B)	< 0,03
Media (M)	0,03-0,06
Alta (A)	0,06-0,09
Muy Alta (MA)	> 0,09

Tabla 3- Clasificación de la extensibilidad de los suelos según su coeficiente de extensibilidad lineal (citada por Thomas et al., 2000).

Extensibilidad lineal

Se determinó el valor de extensibilidad lineal de los 3 perfiles a través de la multiplicación de los valores obtenidos de COLE en cada horizonte por el espesor en cm de cada uno de ellos (USDA, 2010).

4.4 Análisis Estadístico

Se realizó un análisis de componentes principales con las propiedades analizadas con el propósito de tener una visión sintética de la información obtenida de los tres perfiles. La finalidad del método es obtener una representación de los suelos en un espacio reducido (generalmente de dos dimensiones), cuyas dimensiones son las primeras componentes principales, lo que será posible si las mismas acumulan un porcentaje de varianza importante respecto al total. De este modo, este análisis ofrece resultados interesantes si las variables elegidas están suficientemente correlacionadas para que pueda ser posible reducir la dimensión y obtener una ganancia de significación. Este tratamiento permitiría descubrir grupos de suelos afines dentro de todos los estudiados y observar las combinaciones lineales entre todas las variables estudiadas.

El análisis de componentes principales se dividió en dos partes:

- 1) El primero se hizo con el fin de evaluar la mineralogía y las propiedades físico-químicas, e incluyó las variables: contenido de fósforo, contenido de potasio de intercambio, pH, contenido de carbono orgánico, CIC total, porcentaje de arcilla, porcentaje de limo, porcentaje de arena y susceptibilidad magnética.
- 2) El segundo tuvo como objetivo evaluar la interrelación entre las propiedades físicas, e incluyó las variables: capacidad de campo, punto de marchitez permanente, humedad equivalente, coeficiente de extensividad lineal, porosidad total, macroporos, mesoporos y microporos.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados mediante el software Infostat /P v1.1, 2002.

5.RESULTADOS y DISCUSIÓN

Los datos analíticos completos de diversas determinaciones aquí consideradas se presentan en las Tablas incluidas en el Apéndice. En los apartados siguientes todos o parte de esos datos se representan gráficamente, y para algunas determinaciones se acompañan también tablas con los resultados obtenidos.

5.1 Granulométricos

Los resultados de los análisis granulométricos realizados en los tres perfiles de suelos estudiados fueron representados según el contenido de arena, limo y arcilla en función de la profundidad en distintos gráficos.

De acuerdo a estos datos, el suelo de La Paz es el que presenta menor contenido de arena de los tres suelos, con un contenido relativamente mayor en el perfil de cresta respecto al perfil de bajo, y con una ligera disminución con la profundidad (Figura 14).

En este suelo, en el perfil del bajo, el contenido de arena alcanza un máximo de 8,1% en el horizonte A₁ y un mínimo de 3,6% en el horizonte AC₂kss, que resulta similar al porcentaje de arena en la base del perfil de cresta.

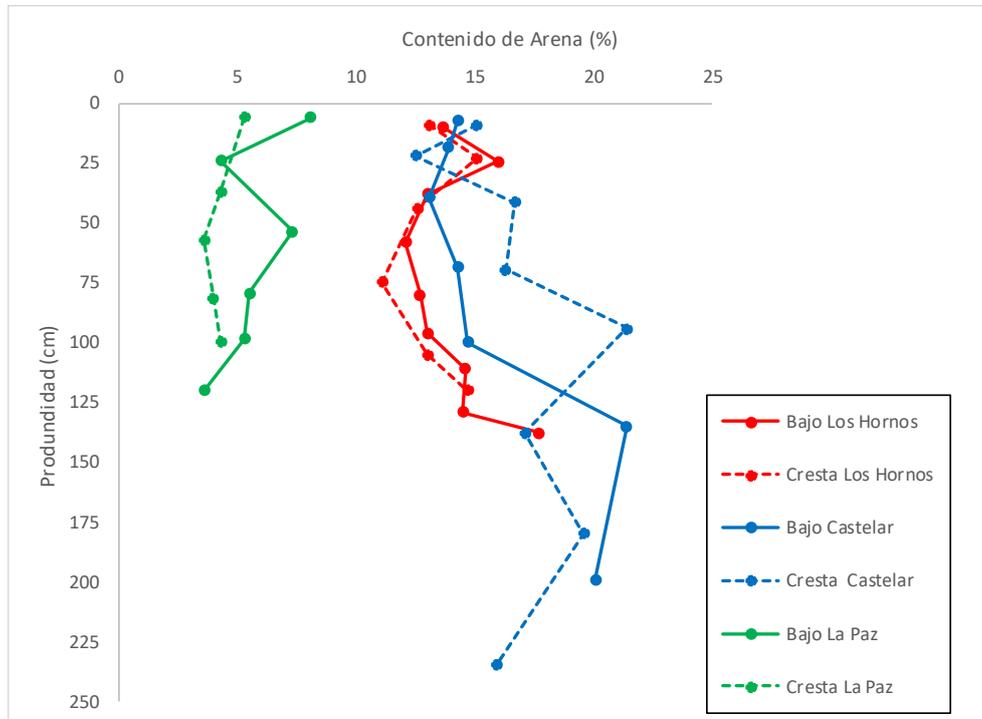


Figura 14- Variación del contenido de arena (%) con la profundidad de los suelos estudiados.

En los suelos de Los Hornos y Castelar, los contenidos de arena oscilan alrededor del 14% en los horizontes superiores, tanto en el bajo como en la cresta. Sin embargo, en el perfil del bajo de Castelar el contenido de arena permanece relativamente constante con la profundidad hasta llegar a unos 140 cm, en el horizonte 2Btk₁, donde se observa un incremento abrupto en coincidencia con la discontinuidad descrita en el campo. Por su parte, en el perfil de cresta de este suelo, el contenido de arena aumenta notoriamente a partir del techo del horizonte Bt, a unos 40 cm de profundidad, con un valor máximo a 1 metro de profundidad. Esta variación en los contenidos de arena entre los perfiles de cresta y bajo de este suelo se relaciona claramente con la variación morfológica de los horizontes descrita en el campo entre los dos sectores de este suelo.

En cuanto al suelo de Los Hornos, los contenidos de arena son muy similares entre cresta y bajo, con una disminución a nivel de los horizontes Bt. Puede notarse además un incremento en el contenido de arena en la base del perfil de bajo, que coincide con la discontinuidad observada en el campo (horizonte 2Ck).

En la Figura 15 se puede observar cómo varía el contenido de limo en los suelos estudiados. En términos generales, se puede constatar allí que el suelo de La Paz es el que presenta también menor contenido de limo, particularmente en el perfil de cresta; el suelo de Castelar presenta una proporción intermedia, en tanto el suelo de Los Hornos es el que presenta mayores contenidos de limo. Debe notarse también que todos los perfiles estudiados, con la excepción del perfil de bajo-La Paz, presentan en esta fracción granulométrica un patrón de distribución similar con la profundidad, dado por una disminución clara del contenido de limo en los horizontes intermedios, seguido de un incremento hacia la base de los perfiles. En el caso del suelo de Los Hornos, es notoria la diferencia en la proporción de limo entre los horizontes Bt del bajo y de la cresta, siendo esas diferencias menos pronunciadas en Castelar y La Paz.

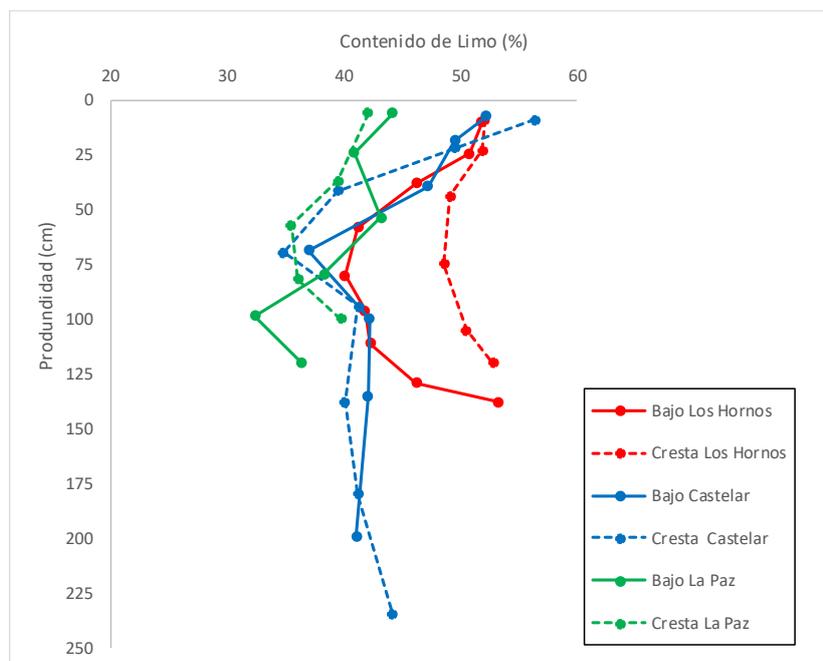


Figura 15- Variación del contenido de limo (%) con la profundidad de los suelos estudiados.

En cuanto a la arcilla, el suelo de La Paz presenta los mayores contenidos con valores que oscilan alrededor de un 55%, con incrementos irregulares hacia la base de los perfiles (Figura 16). Por su parte, de manera general los perfiles del suelo de Castelar presentan contenidos de arcilla intermedios en tanto el suelo de Los Hornos presenta la proporción menor. En los horizontes A de los suelos de Castelar y Los Hornos, el contenido de arcilla es ligeramente superior a un 30%. También debe notarse que, a modo de espejo con los contenidos y las variaciones verticales del limo, el porcentaje de arcilla aumenta notoriamente en los horizontes Bt de estos dos suelos, alcanzando un 48% en el caso del suelo de Castelar, y con una diferencia notable entre los perfiles de bajo y cresta en el caso del suelo de Los Hornos.

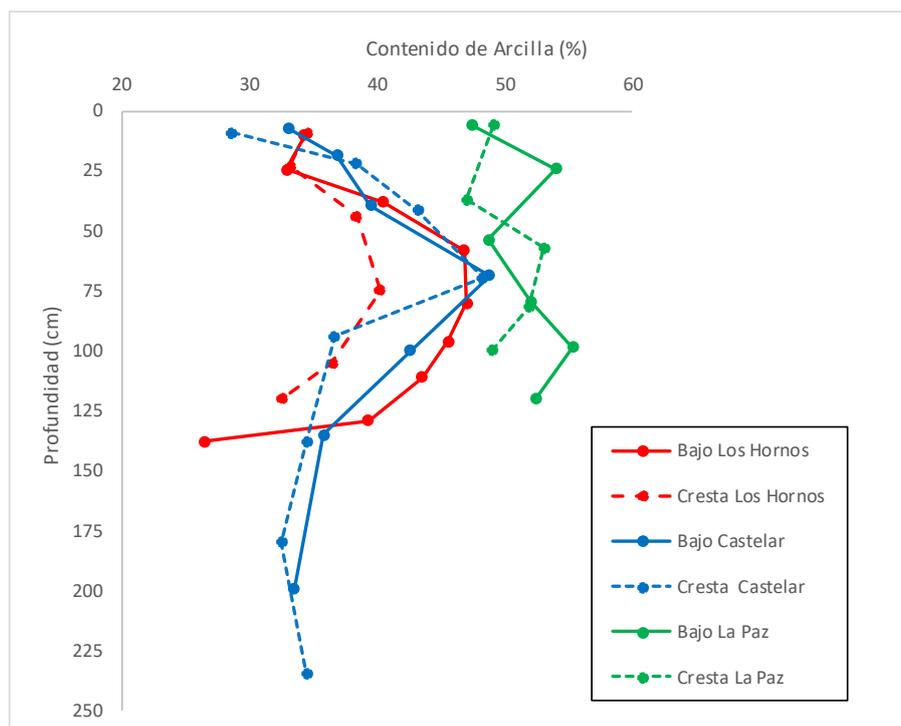


Figura 16- Variación del contenido de arcilla (%) con la profundidad de los suelos estudiados.

A partir de estos datos granulométricos, es posible realizar algunas consideraciones respecto a los materiales parentales y los procesos pedogénicos en los tres suelos estudiados. Por un lado, y considerando las muestras de los perfiles de bajo de

los tres suelos tomadas aproximadamente entre 125-140 cm de profundidad (La Paz, horizonte Ckss entre 109-126+cm; Castelar, horizonte. 2Btk₁ entre 120-150 cm; Los Hornos, horizonte 2Ck entre 138-150 cm) se constata una disminución del contenido de arcilla en el sentido norte-sur, esto es La Paz (52 %) > Castelar (36 %) > Los Hornos (26 %). Inversamente, en ese mismo sentido aumenta el contenido de limo (36 %; 42 %; 53 %). En cuanto a la arena, muy escasa en La Paz (4 %), aparecen contenidos mucho mayores en Castelar (21%) y Los Hornos (18%). Estas diferencias granulométricas hacen que las texturas de la base del perfil de bajo-La Paz sea arcillosa; la de bajo-Castelar, franco arcillosa y la del bajo-Los Hornos, franco arcillo limosa.

Por otro lado, si se considera el contenido de arena de los suelos como una fracción inmóvil, no susceptible de translocación por procesos de iluviación y en consecuencia representativa del sedimento que constituye el material parental, podrían inferirse algunas particularidades de cada suelo. Así, comparando los contenidos de arena de los perfiles de cresta y bajo del suelo de La Paz, se constata que las variaciones con la profundidad son relativamente similares. Esto estaría sugiriendo que los perfiles de cresta y bajo se han desarrollado en toda su profundidad a partir de un mismo material parental, en tanto el bajo habría incrementado ligeramente el contenido de arcilla en el horizonte descrito como Bt por iluviación y/o neoformación.

Considerando el suelo de Castelar, en el perfil del bajo el contenido de arena presenta un incremento abrupto a unos 140 cm (horizonte 2Btk, entre 120-150 cm) en tanto en el perfil de cresta se observa un aumento considerable del contenido de arena a 100 cm de profundidad (horizonte 2Btss, entre 80 y 106 cm). En consecuencia, esta variación de la arena está sugiriendo que en este suelo se presenta al menos una discontinuidad litológica, la que aparece más cerca de la superficie en el perfil de cresta, y en la que se ha desarrollado la parte inferior del horizonte Bt del suelo actual.

Finalmente, de acuerdo al contenido de arena en el suelo de Los Hornos, los solum de cresta y bajo se habrían desarrollado a partir de un mismo material parental. Debe mencionarse que en la base de este suelo se ha descrito una discontinuidad (horizonte 2Ck, a partir de los 138 cm de profundidad), que se refleja en el análisis granulométrico también por un mayor contenido de arena.

5.2 Análisis mineralógicos

5.2.1-Mineralogía de la fracción arcilla por DRX

De los análisis mineralógicos efectuados en todos los horizontes de los seis perfiles de bajo y cresta estudiados se seleccionaron algunos diagramas representativos correspondientes a horizontes superficiales (A_1), horizontes subsuperficiales (Bt y AC) y horizontes más profundos BC y C. En el suelo de La Paz, los diagramas de los análisis por difracción de rayos X (Figuras 17 y 18) muestran una gran similitud entre todas las muestras de ambos perfiles. Los diagramas de las muestras originales (en las figuras, registros en rojo) presentan picos de gran desarrollo a unos 15 Å correspondientes a esmectitas. En las muestras glicoladas (registros en azul), ese pico se traslada a unos 18 Å evidenciando la expansión de las arcillas esmectíticas, en tanto que en las muestras calcinadas (registros en verde) se produce el colapso de los espacios interfoliares y la aparición de un pico desarrollado a unos 10 Å. Por otro lado, en los diagramas de muestras originales se observa un pequeño pico a unos 10 Å correspondiente a illita. Esta reflexión es un poco más evidente en el horizonte A de ambos perfiles, en tanto en los horizontes subyacentes se manifiesta como un pequeño hombro en el diagrama. En estos otros horizontes ese pico a 10 Å queda mejor expresado en las muestras glicoladas al separarse las reflexiones correspondientes a las esmectitas. También, en los diagramas de arcillas naturales se observa un pico a unos 7 Å atribuible a arcillas caoliníticas, que presenta una

intensidad aproximadamente similar en todas las muestras. Este pico desaparece en las muestras calcinadas confirmando la presencia de caolinitas. Finalmente, en los diagramas de DRX de la fracción arcilla se constata la presencia de cuarzo y feldespatos como minerales accesorios.

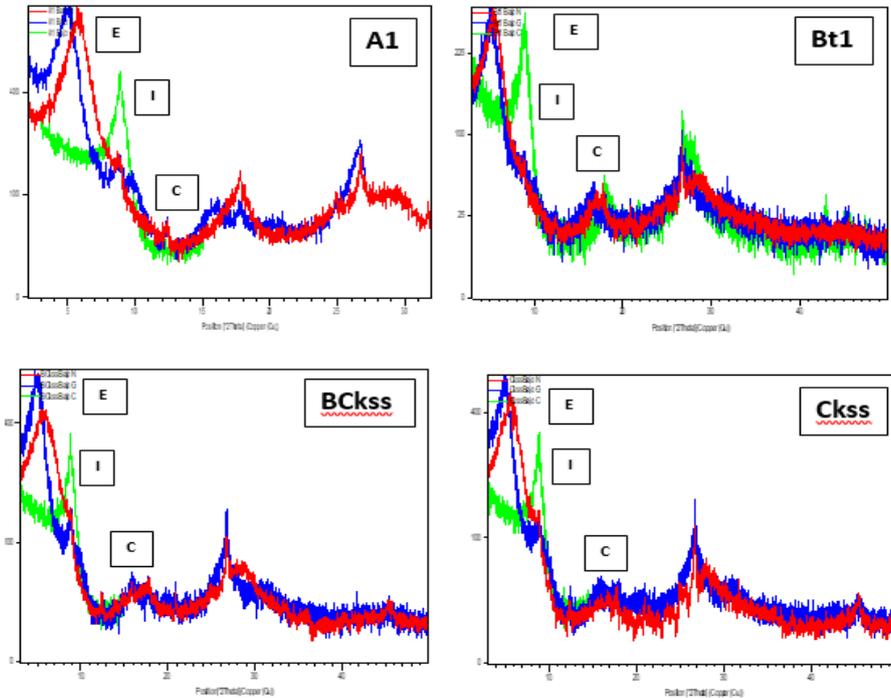


Figura 17- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras arcillas originales (rojo), glicoladas (azul) y calcinadas (verde) de los horizontes A₁, Bt₁, BCKss y Ckss del sector del bajo del suelo de La Paz. E=esmectita; I=illita; C=caolinita.

En síntesis, el análisis mineralógico de la fracción arcilla del Vertisol de La Paz pone en evidencia una gran similitud entre todos los horizontes de los perfiles de cresta y bajo, con la dominancia de esmectita acompañada por proporciones menores de illita y caolinita. Debe destacarse que las arcillas esmectíticas son también dominantes en los horizontes superficiales de ambos perfiles. Estos resultados indican una gran

homogeneidad composicional en el material parental del suelo, tanto en sentido vertical como lateral, lo que se corresponde con los resultados del análisis granulométrico.

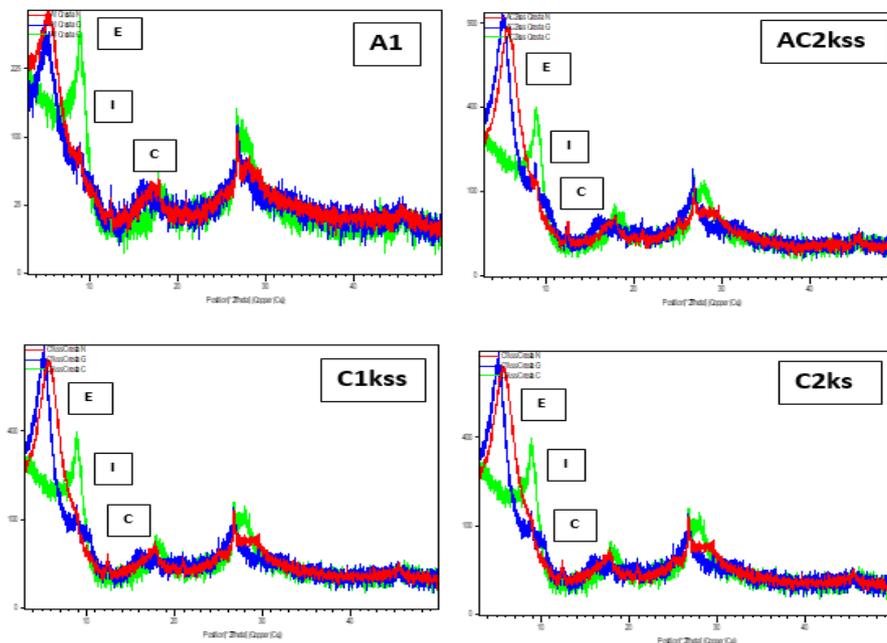


Figura 18- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales (rojo), glicoladas (azul) y calcinadas (verde) de los horizontes A₁, AC₂kss, C₁kss y C₂kss del sector de la cresta del suelo de La Paz. E=esmectita; I=illita; C=caolinita.

En cuanto al suelo de Los Hornos, el difractograma de la arcilla del horizonte A del perfil de bajo es muy similar al del horizonte A del suelo de Castelar, indicando dominancia de illita acompañada por proporciones menores de caolinita y minerales interestratificados illita-esmectita (I-E), además de cuarzo y feldespatos (Figura 19). En el horizonte Btss2 localizado entre los 70-90 cm de profundidad, el diagrama presenta bastante similitud con el del horizonte A suprayacente, aunque se evidencia también un muy ligero aumento de los minerales interestratificados I-E. En los horizontes subsiguientes BC₁ y 2Ck, el hombro en la cola de reflexiones hacia los ángulos pequeños está indicando tanto un aumento de la proporción de minerales interestratificados I-E como del componente esmectítico de los mismos, en detrimento de la proporción de illita.

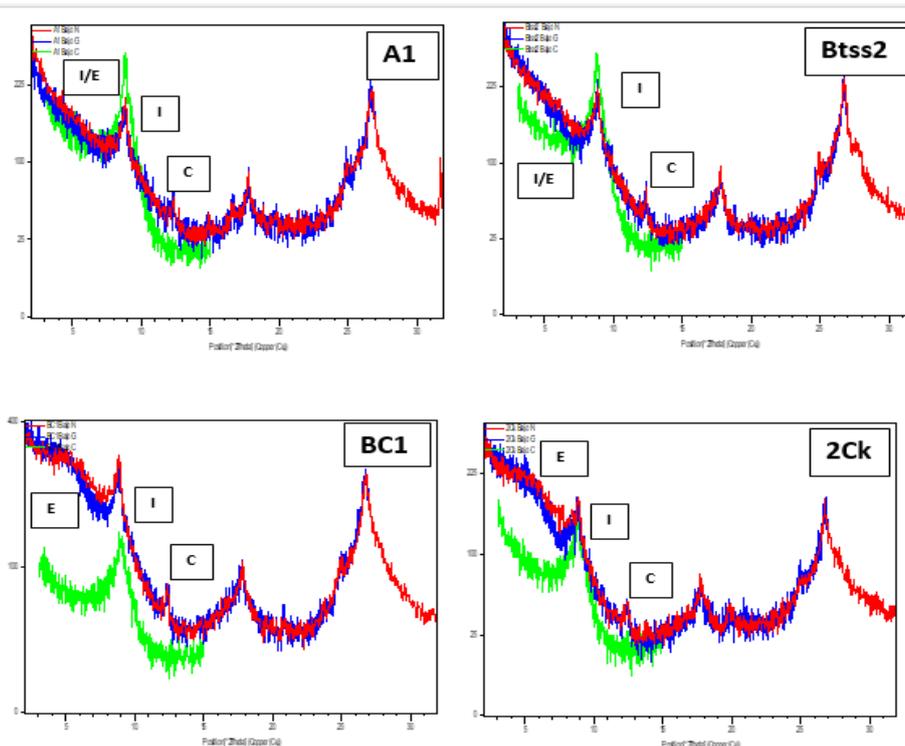


Figura 19- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales (rojo), glicoladas (azul) y calcinadas (verde) de los horizontes A₁, Btss₂, BC₁ y 2Ck del sector del bajo del suelo de Los Hornos. E=esmectita; I=illita; C=caolinita.

En el perfil de cresta del suelo de Los Hornos (Figura 20), la composición mineralógica de la fracción arcilla del horizonte A resulta similar al del mismo horizonte en el perfil de bajo, esto es, con una pequeña proporción de interestratificados I-E entre los minerales expandibles. Por el contrario, en los horizontes subyacentes aumenta claramente la proporción de las arcillas expandibles con la profundidad. En el horizonte Bt₁, y a diferencia del horizonte Btss₂ del perfil del bajo situado a la misma profundidad, en este caso la muestra natural presenta reflexiones amesetadas hacia los pequeños ángulos, con una intensidad ligeramente mayor hacia los 15 Å. En conjunto con los tratamientos de muestras glicoladas y calcinadas puede interpretarse la presencia de interestratificados I-E y una pequeña proporción de esmectita. Por su parte, en los

horizontes BC₁ y BC₂ aparece mejor definido un pico amplio hacia los 15 Å, evidenciando claramente la presencia de esmectitas, en contraste con la mineralogía de los horizontes del bajo a las mismas profundidades.

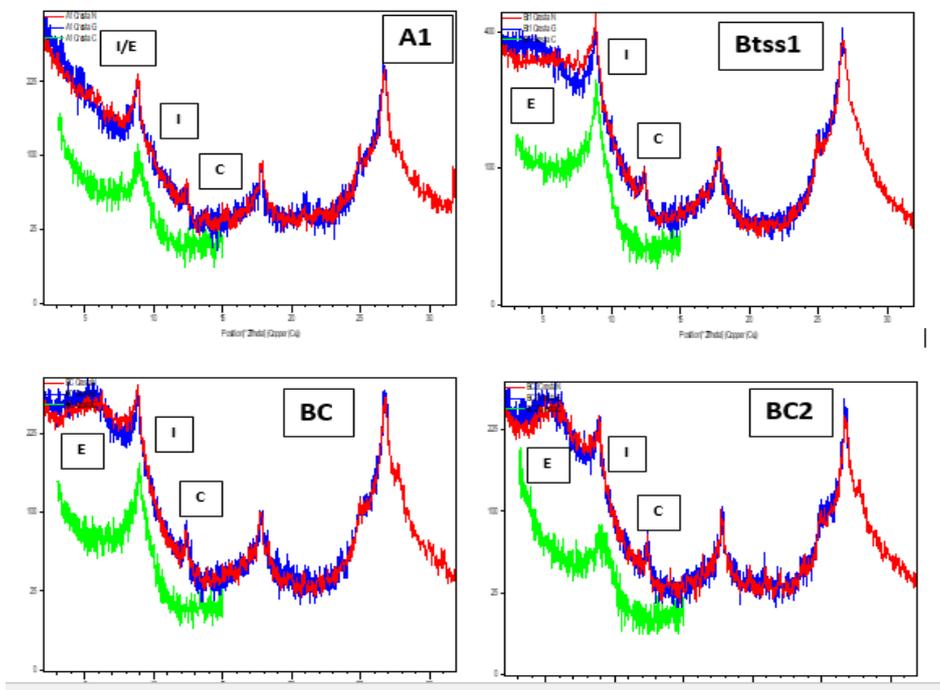


Figura 20- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales (rojo), glicoladas (azul) y calcinadas (verde) de los horizontes A₁, Btss₁, BC₁ y BC₂ del sector de la cresta del suelo de Los Hornos. E=esmectita; I=illita; C=caolinita.

Contrariamente a lo descrito para el suelo de La Paz, los diagramas de difracción de rayos X del suelo de Castelar muestran una composición mineralógica diferente y más heterogénea. Así, en el horizonte A del perfil del bajo se observa una predominancia de illita representada por un pico intenso a los 10 Å (Figura 21). Hacia los ángulos pequeños, entre 11 y 14 Å, se observa un hombro de reflexiones correspondiente a una pequeña proporción de minerales interestratificados irregulares del tipo I-E. La presencia de estos minerales es corroborada en el diagrama de la muestra glicolada por un ligero desplazamiento de las reflexiones hacia los ángulos más pequeños, y en la muestra

calcinada por una contracción de los espacios interlaminares del componente esmectítico y un reforzamiento del pico a 10 Å. Asimismo, la reflexión a unos 7 Å evidencia también la presencia de caolinita en escasa cantidad. Además de estos minerales de arcilla, las reflexiones hacia 3,3 Å evidencian la presencia de cuarzo y feldespato en la fracción fina.

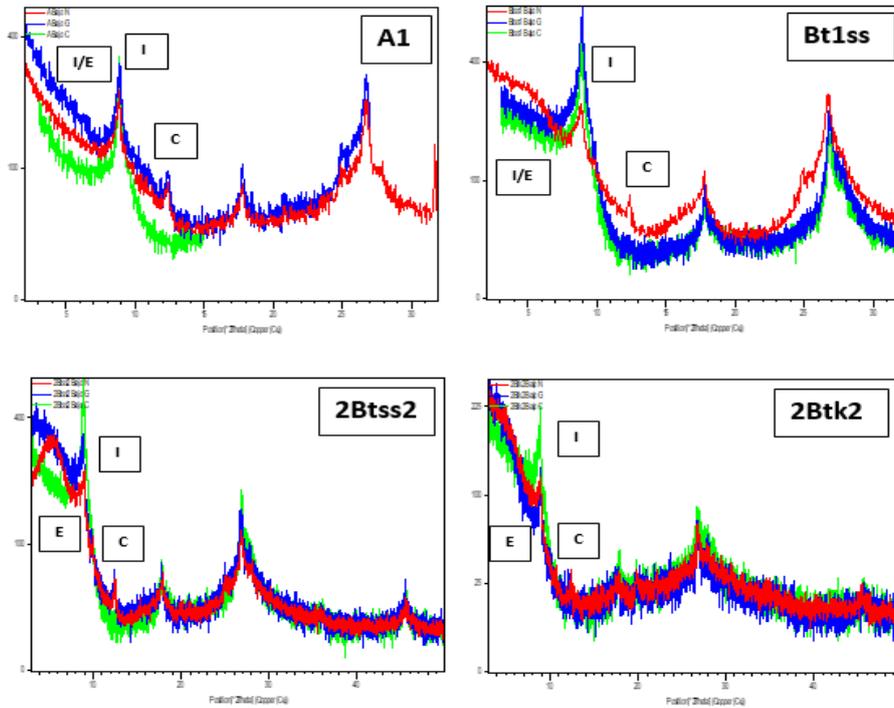


Figura 21- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales (rojo), glicoladas (azul) y calcinadas (verde) de los horizontes A₁, Bt_{1ss}, 2Btss₂ y 2Btk₂ del sector del bajo del suelo de Castelar. E=esmectita; I=illita; C=caolinita.

En los horizontes Bt subyacentes (Figura 21) la caolinita, de acuerdo a la intensidad de los picos, se presenta en proporciones semejantes a la existente en el horizonte A. Por el contrario, es evidente una disminución de la proporción de illita y un incremento de los minerales expandibles con la profundidad. Así, en el diagrama correspondiente al horizonte Bt₁ disminuye la proporción de illita respecto al horizonte A, en tanto que en los pequeños ángulos se presenta una cola de reflexiones con un hombro hacia los 15 Å, indicando un ligero aumento de minerales interestratificados

irregulares I-E. En el horizonte 2Btss₂, al tiempo que disminuye el pico de la illita, se define una reflexión intensa hacia los 15 Å, indicando una proporción elevada de minerales expandibles, tanto interestratificados I-E como esmectita, con dominancia de esta última. Por su parte, en el horizonte 2Btk₂, descrito entre 150-248 cm de profundidad, la cola de reflexiones continuas hacia los pequeños ángulos, junto con los tratamientos de glicolado y calcinado, indican tanto una ligera disminución de la presencia de esmectita respecto al horizonte anterior como un incremento relativo de los minerales interestratificados I-E.

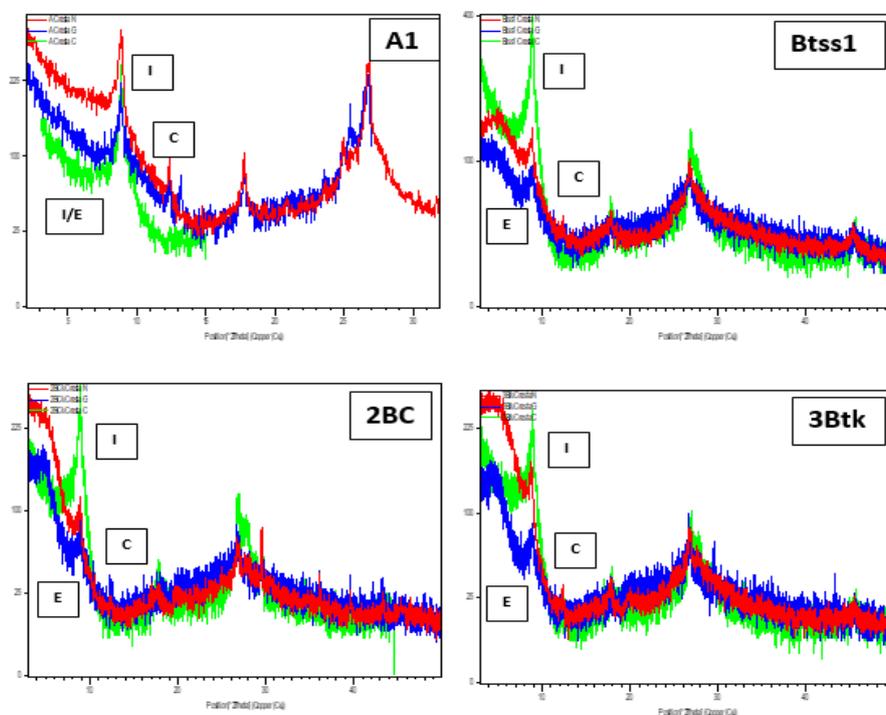


Figura 22- Diagramas de difracción de rayos X sobre muestras de arcillas naturales (rojo), glicoladas (azul) y calcinadas (verde) de los horizontes A₁, Bt_{1ss}, 2BC y 3Btk del sector de la cresta del suelo de Castelar. E=esmectita; I=illita; C=caolinita.

En el horizonte A del perfil de cresta, el diagrama es similar al del horizonte A del bajo (Figura 22). Por el contrario, en el horizonte Btss₁, la reflexión de base amplia desarrollada hacia los 15 Å y los tratamientos por calcinación y glicolación indican un

aumento en la proporción de minerales interestratificados I-E y del componente esmectítico de los mismo respecto al Bt_{ss1} del bajo.

En las muestras de los horizontes 2BCk y 3Btk₂, que por profundidad son en conjunto equivalentes al horizonte 2Btk₂ del perfil del bajo, además de las reflexiones correspondientes a illita y caolinita similares a las de los horizontes suprayacentes, se destaca la cola de reflexiones hacia los pequeños ángulos a partir de los 11 Å, que indica la presencia de una proporción importante de interestratificados irregulares I-E, con predominancia del componente esmectítico. La presencia de estos minerales expandibles se corrobora por la definición de un pico a unos 18 Å en la muestra glicolada y la importante expresión del pico a 10 Å en la muestra calcinada.

En síntesis, el análisis mineralógico de la fracción arcilla muestra la existencia de diferencias composicionales entre los tres suelos estudiados. Si bien entre los tres suelos hay pequeñas diferencias en los contenidos de illita y caolinita, las diferencias fundamentales se encuentran en los componentes expansibles. Por su lado, el suelo de La Paz se caracteriza por la abundancia de esmectita, que aparece en proporciones similares en todos los horizontes y tanto en el bajo como en la cresta. Por el contrario, en términos generales, en los suelos de Castelar y los Hornos predominan los minerales de arcilla interestratificados I-E.

Aún más relevante que lo anterior es que estos análisis ponen en evidencia la existencia de diferencias en las proporciones relativas de los minerales expandibles entre los perfiles de cresta y bajo de los suelos de Castelar y Los Hornos. Por un lado, en los perfiles de cresta de ambos suelos aparece un incremento de la proporción de esmectitas más cerca de la superficie que en el perfil de bajo. Por otro lado, si bien en Castelar hay alguna diferencia en la proporción de minerales interestratificados I-E y esmectita entre

cresta y bajo, esta no es tan notoria. Por el contrario, en el bajo del suelo de Los Hornos predominan los interestratificados I-E, mientras que en la cresta predomina la esmectita. En consecuencia, estos resultados sugieren la existencia de distintos procesos de pedogénesis o diferente intensidad de los mismos procesos entre los tres suelos aquí estudiados.

5.2.2 Susceptibilidad magnética

La determinación de la susceptibilidad magnética, que integra información sobre tipo, concentración y tamaño de grano de los minerales de la fracción magnética, permite discriminar claramente los tres suelos entre sí, así como en función de los valores de este parámetro entre cresta y bajo de cada suelo (Figura 23).

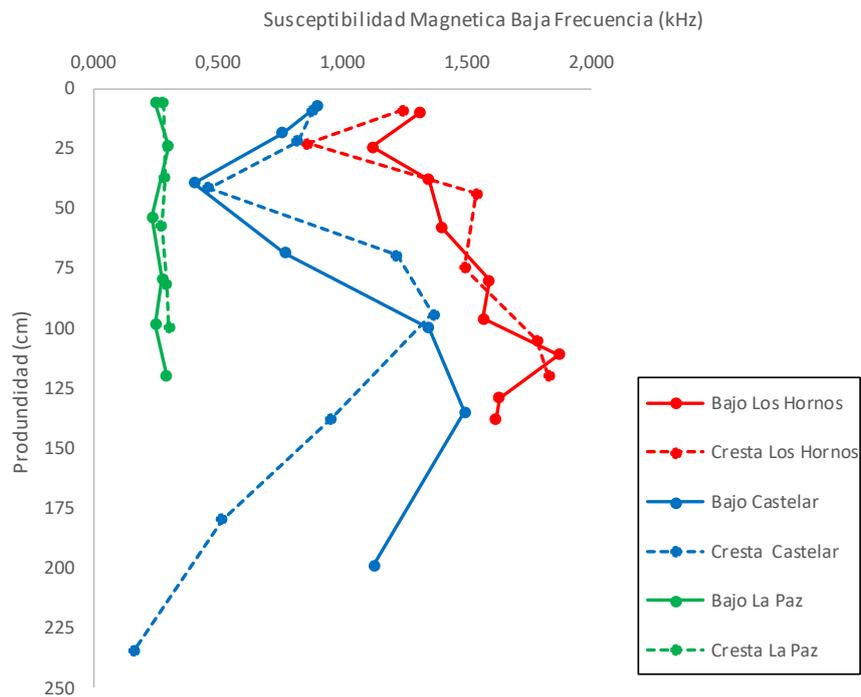


Figura 23- Variación de la susceptibilidad magnética en baja frecuencia (kHz) con la profundidad de los suelos analizados.

En primer lugar, el suelo de La Paz presenta los valores menores de susceptibilidad magnética de los tres suelos. Como se aprecia en el gráfico, en este suelo los valores de este parámetro son constantes con la profundidad y además similares entre cresta y bajo, indicando en consecuencia una homogeneidad composicional en el material mineral del suelo tanto entre los diversos horizontes, como entre los dos sectores del suelo. Estos resultados concuerdan con los resultados tanto del análisis granulométrico como del análisis mineralógico de la fracción arcilla, que indican también la homogeneidad tanto vertical como horizontal en el material parental de este suelo.

En el caso del suelo de Castelar, los valores de susceptibilidad magnética son intermedios entre los otros dos suelos (Figura 23). Por otro lado –y a diferencia del suelo de la Paz-, los valores muestran importantes oscilaciones con la profundidad, así como algunas diferencias entre los sectores de cresta y bajo. En la sección superior del suelo, primero se observa una disminución notoria en ambos perfiles en el techo del horizonte Bt, a unos 35 cm de profundidad. Luego, la SM aumenta alcanzando valores máximos que se manifiestan en la base del horizonte Bt, a unos 90 cm de profundidad en el bajo y a unos 130 cm en la cresta. Por debajo de estas profundidades, la susceptibilidad magnética disminuye progresivamente hacia la base del perfil. Por otro lado, los valores son más bajos en el sector de cresta que en el del bajo, lo que se relacionaría con el mayor contenido de carbonato de calcio en el primero. En la sección inferior de los perfiles, la baja intensidad de la señal magnética estaría reflejando una diferencia composicional del sedimento respecto al loess superficial, y posiblemente también procesos secundarios de reducción del contenido en minerales de hierro con propiedades magnéticas.

Por su parte, en el suelo de Los Hornos la susceptibilidad magnética es mayor que en los otros dos suelos (Figura 23) y con marcadas oscilaciones con la profundidad. Sin embargo, estas oscilaciones resultan similares a las observadas en el suelo de Castelar.

Así, se constata una disminución de la susceptibilidad magnética a unos 24 cm de profundidad, en la base del horizonte A₂, a partir de lo cual aumenta progresivamente hasta alcanzar valores máximos en la base del suelo. Por otro lado, si bien los valores de susceptibilidad magnética son relativamente similares entre bajo y cresta, se observa, no obstante –y de manera equivalente a lo observado en el suelo de Castelar- un valor ligeramente mayor en la cresta.

De acuerdo a estudios efectuados en suelos de la Pampa Ondulada, la señal magnética está determinada fundamentalmente por la composición de la fracción gruesa (Morrás, 2020). Liu et al. (2010) estudiaron las propiedades magnéticas de un Argiudol típico y un Argiudol vértico situados muy próximos entre sí en el área de Castelar, aunque claramente diferenciados en la composición mineralógica de las distintas fracciones, y específicamente en los contenidos de cuarzo y vidrio de su fracción arena. El Argiudol vértico, equivalente al suelo de Castelar aquí estudiado, evidenció una susceptibilidad magnética muy inferior a la del Argiudol típico, mostrando también valores máximos en el horizonte Bt. Por su parte, Altinier et al.,(2010) compararon la susceptibilidad magnética de un Argiudol típico desarrollado sobre un loess arenoso en Chivilcoy, situado al oeste de la Pampa Ondulada, con la de un Argiudol vértico desarrollado sobre un loess típico situado en San Pedro, al este de la Pampa Ondulada. En este trabajo se constató también que el valor de susceptibilidad magnética en el suelo vértico de San Pedro era la mitad que la del suelo en Chivilcoy, lo que se relacionaría con la granulometría más gruesa y una mayor proporción de magnetita litogénica en este último. En otros términos, dado que la mayor parte del valor de la susceptibilidad magnética está dado por la arena, esto da indicios sobre las características del material parental. Los resultados de susceptibilidad magnética aquí obtenidos se correlacionan en consecuencia con los datos granulométricos y de la mineralogía de arcillas, indicando que los tres suelos

se han desarrollado a partir de materiales parentales diferentes. En el caso de los suelos de Castelar y Los Hornos, aun cuando los valores absolutos de susceptibilidad magnética son diferentes, resulta también interesante observar que las variaciones en profundidad y las diferencias entre cresta y bajo son similares entre los dos suelos.

5.4 Análisis químicos y físico-químicos

De todos los parámetros químicos y físico-químicos evaluados, se seleccionaron cinco que se consideraron relevantes para caracterizar los diferentes suelos estudiados. Los parámetros elegidos fueron: contenido de carbono orgánico (CO), contenido de fósforo (P) extractable, contenido de potasio de intercambio (Ki), pH en agua, y capacidad de intercambio catiónico (CIC) (ver Apéndice).

5.4.1- Carbono orgánico

Los resultados analíticos obtenidos correspondientes al contenido de CO de los suelos estudiados se presentan en la Figura 24. Los horizontes superficiales, el bajo del perfil de La Paz y tanto el bajo y la cresta del perfil de Los Hornos son los que presentan mayores contenidos de CO (2,5%), en tanto la cresta del perfil de La Paz junto con el bajo y la cresta del perfil de Castelar presentan menores contenidos de CO (alrededor de 1,5%). A partir de allí, en el bajo de los 3 perfiles se observa un decrecimiento marcado con la profundidad, lo que lleva a que en el límite superior del horizonte Bt, entre 25-40 cm de profundidad, el contenido de CO en los tres perfiles sea relativamente similar, entre 0,6 y 0,9%. En la parte media e inferior del Bt la disminución del CO es progresiva con la profundidad, observándose que en el bajo de Los Hornos el contenido del CO es superior al de los otros dos perfiles, en el bajo de La Paz es intermedio, y el menor valor se presenta en el bajo de Castelar. Por el contrario, en las posiciones de cresta la disminución del CO

en función de la profundidad es algo más irregular y diferente entre los tres perfiles, A partir del metro de profundidad los tres perfiles, tanto en bajos como crestas, presentan similares contenidos de CO.

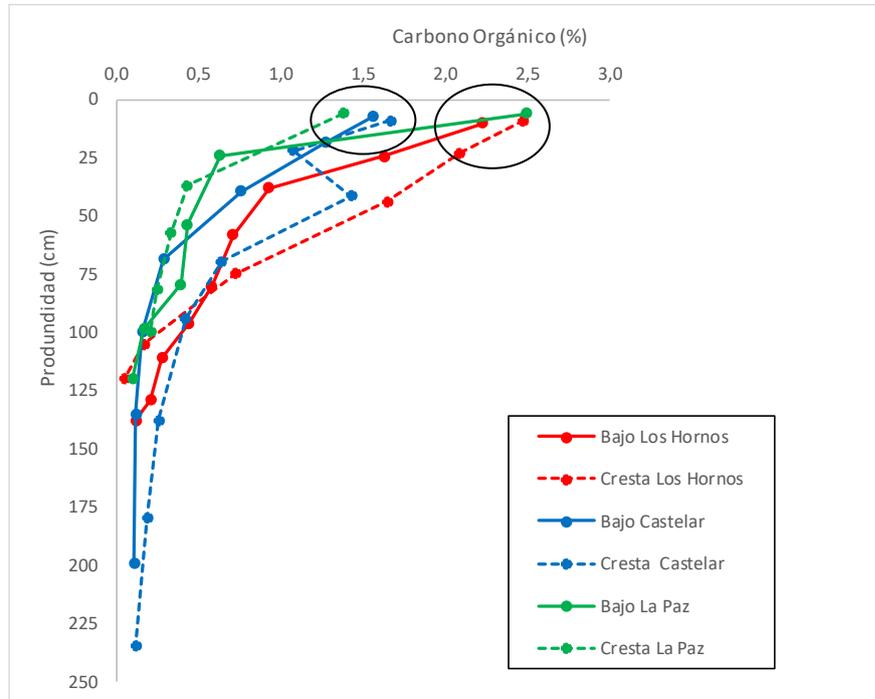


Figura 24- Variación del contenido de carbono orgánico con la profundidad de los suelos estudiados.

5.4.2-Fósforo extractable

En la Figura 25 se observa la variación del contenido de P extractable con la profundidad. Como se sabe, esta fracción está constituida por diferentes aniones fosfóricos, en gran proporción adsorbidos sobre sitios de intercambio de arcilla y materia orgánica, así como superficies sorbentes de oxi-hidróxidos.

Con la excepción notoria del perfil bajo-Los Hornos el contenido de P extractable y su variación con la profundidad es similar en todos los perfiles hasta aproximadamente el metro de profundidad. Salvo excepción, en estos suelos el contenido de esta fracción es inferior a 10 mg Kg^{-1} , (La Paz es oscilan alrededor de 10 mg Kg^{-1} , suelo de Castelar lo

sigue con 5 mg Kg^{-1} y bajo de Los Hornos con valores cercanos a 3 mg Kg^{-1}) lo cual constituye un valor reducido y en consonancia con lo establecido para suelos del noreste pampeano (Darwich, 1983) y Entre Ríos (Quintero et al., 2000). Como fue señalado por Morrás (2020), los bajos valores de P total y soluble en los suelos de esta región se relacionan con la mineralogía del material parental, constituido por aportes de sedimentos esmectíticos pobres en minerales fosfáticos a diferencia de los loess pampeanos característicos procedentes de fuentes del oeste.

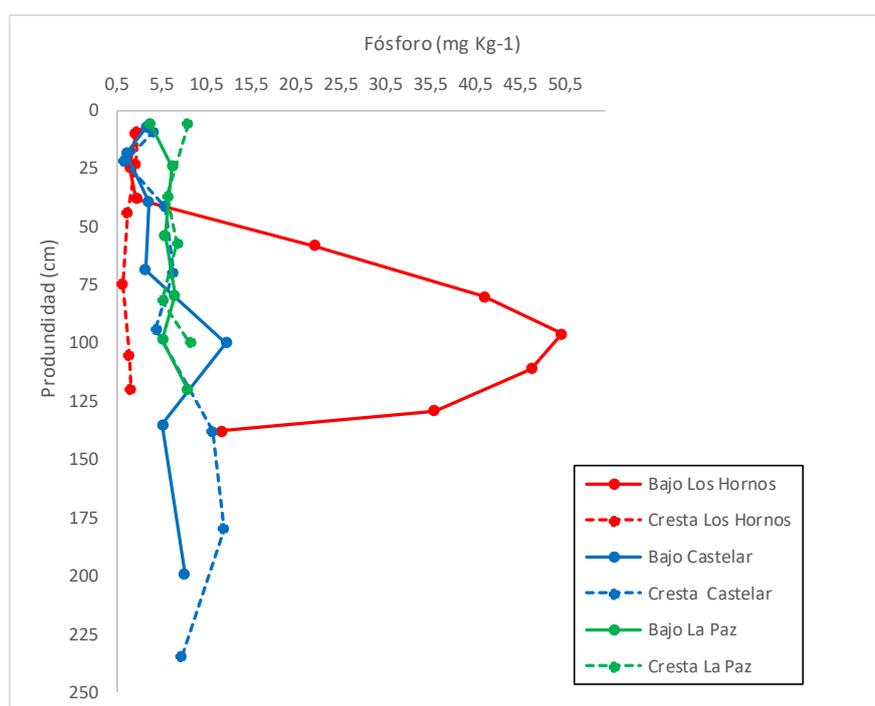


Figura 25- Variación del contenido de Fósforo extractable con la profundidad en los suelos estudiados.

En el perfil de Castelar, a partir de los 100 cm de profundidad y tanto en sus posiciones de bajo como de cresta, se constata un contenido mayor de P extractable que en la porción superior del suelo, lo que podría reflejar ya el cambio en la composición del material sedimentario. Por su parte, el perfil de bajo-Los Hornos presenta un caso muy particular y anómalo, con incremento progresivo del contenido de P extractable en el horizonte Bt, alcanzando hasta unos 50 mg/Kg a los 100 cm de profundidad. Dado que

este suelo no ha sido cultivado ni fertilizado, los valores de P extractable aquí encontrados podrían estar eventualmente relacionados con restos biológicos, posiblemente óseos, no identificados.

5.4.3-pH en agua

En los horizontes superficiales, y con excepción de la cresta del suelo de La Paz que tiene un pH de 7,5 (Figura 26), los perfiles tienen valores similares de pH, estando estos dentro del intervalo 5,8 a 6,3. Por el contrario, en los horizontes subyacentes se distinguen dos situaciones. En los suelos de La Paz y Castelar el pH aumenta progresivamente con la profundidad. Además, puede constatarse que en los perfiles de cresta de estos dos suelos el pH se eleva más rápidamente, alcanzando valores superiores a 8 en horizontes más superficiales que en el perfil correspondiente de bajo, en coincidencia con la presencia más superficial de los rasgos de acumulación de CaCO_3 , tal como fuera descrito en el campo. Así, en el suelo de La Paz, en el perfil de cresta los rasgos que denotan la presencia de carbonatos aparecen ya a partir de los 12-42 cm de profundidad (horizonte $\text{AC}_{1\text{kss}}$), en tanto en el perfil de bajo de este suelo los carbonatos aparecen recién a los 71-88 cm (horizonte Btk_{ss}). En el suelo de Castelar, en el perfil de cresta, los carbonatos aparecen a partir de los 106 cm de profundidad (horizonte 2Bt_{ssk}), en tanto en el perfil de bajo aparecen a partir de los 120 cm (horizonte 2Btk_1). Además, en este suelo resulta notoria una diferencia de más de una unidad de pH para las mismas profundidades entre los perfiles de cresta y bajo, lo que reflejaría también diferencias en los contenidos de CaCO_3 entre ambos sectores del suelo.

A diferencia de los otros suelos, en el suelo de Los Hornos y tanto en la cresta como en el bajo el valor de pH oscila alrededor de 6 hasta los 100 cm de profundidad, incluso con una pequeña disminución en la parte superior y media del Bt. Con estos

valores de pH, y en acuerdo con la descripción de campo, en la cresta de este suelo no se observaron carbonatos en los niveles superficiales del horizonte Bt. En este suelo, el pH aumenta abruptamente a 8 en el horizonte 2Ck del perfil del bajo, en relación con la presencia allí de nódulos calcáreos.

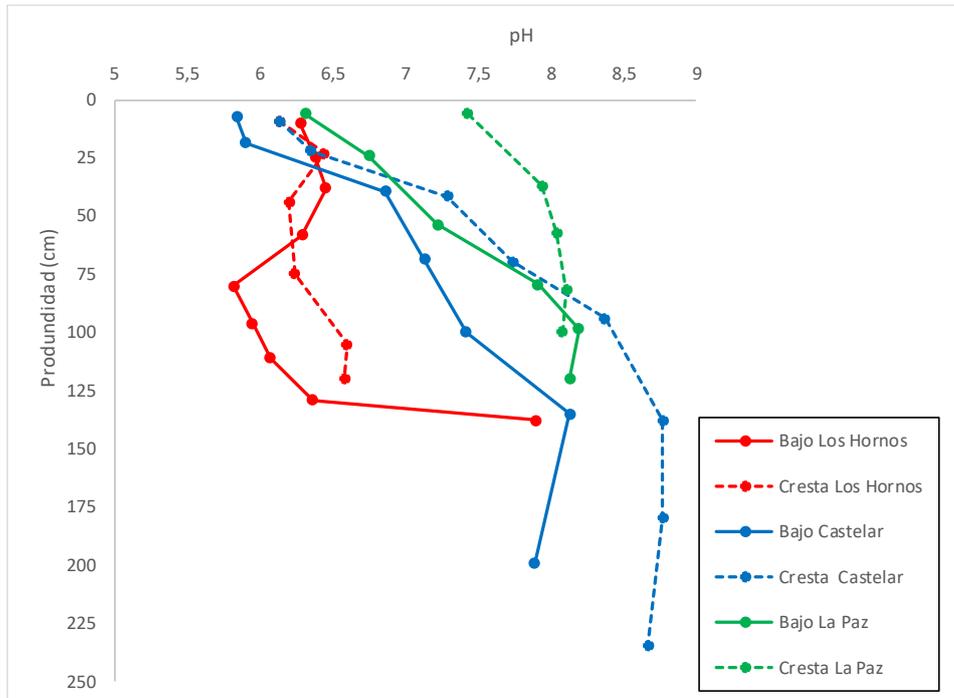


Figura 26- Variación del pH con la profundidad de los suelos estudiados.

5.4.4- Capacidad de intercambio catiónico

En todos los suelos se observa que el horizonte superficial tiene valores de CIC que van entre 25 y 33 cmol Kg^{-1} (Figura 27). Más específicamente, los dos perfiles del suelo de Castelar presentan los valores menores, los perfiles de Los Hornos presentan valores intermedios, en tanto el suelo de La Paz presenta una CIC ligeramente mayor. Estas diferencias se relacionan con la composición de la fracción coloidal de esos horizontes: en el caso del suelo de la Paz, si bien el contenido de CO es similar al de los otros horizontes A (Figura 24), el contenido de arcilla es mayor y está caracterizada por la abundancia de esmectita. En el caso de los suelos de Los Hornos y Castelar, la fracción

arcilla es similar tanto en su cantidad como en su mineralogía (illita e interestratificados I/E), pero en Los Hornos el contenido de CO es superior al horizonte superficial de Castelar.

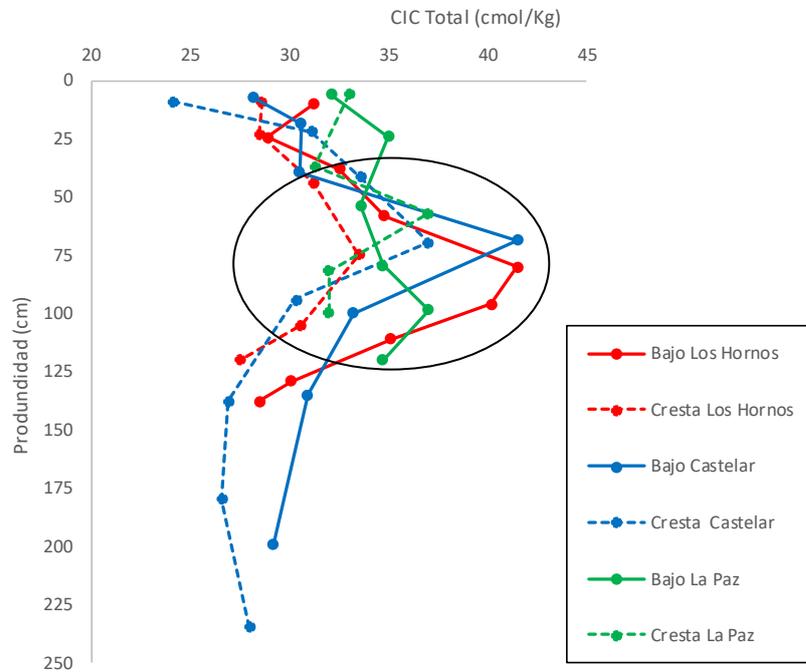


Figura 27- Variación de la CIC total con la profundidad de los suelos estudiados.

Luego, y a través de un aumento progresivo de la CIC con la profundidad, se observa que en los tres suelos se alcanzan valores máximos en la parte media de los perfiles, entre los 55-100 cm de profundidad y con valores de CIC que van entre los 33 y 43 cmol Kg^{-1} , según los perfiles. Resulta notorio que los valores máximos se presentan en los perfiles de bajo-Castelar y bajo-Los Hornos, en el horizonte Bt a los 75 cm de profundidad, en coincidencia con la mayor proporción de arcilla a ese nivel en ambos casos (ver Figura 16). Coincidentemente, en los perfiles de cresta de estos dos suelos a esa misma profundidad los valores de CIC son inferiores; a pesar de que en estos casos las arcillas contienen un poco más del componente esmectítico, Al menos en el caso de cresta-Los Hornos, esta menor CIC se daría por una menor proporción de arcilla, pero la

causa no resulta clara en el caso de cresta-Castelar. La contribución de la materia orgánica a la CIC en los Bt sería reducida dada su escasa proporción. Por su parte, el suelo de La Paz constituye un caso diferente: Aun cuando el contenido de arcilla es superior al de los suelos de Castelar y Los Hornos y su composición es esmectítica, los niveles de CIC se encuentran en el rango de esos otros suelos. No obstante esto, comparando la variación en profundidad del contenido de arcilla en cresta y bajo de La Paz (Figura 16) con la variación de la CIC en los dos perfiles de este suelo (Figura 27), se aprecia una notable coincidencia entre las curvas (máximos de CIC y arcilla a los 60 cm en la cresta y a los 100 cm en el bajo). En este caso, el contenido de CO es muy similar entre cresta y bajo, salvo en el horizonte superficial, y no estaría influyendo en las variaciones y diferencias de CIC entre ambos perfiles.

A partir los 100 cm, en los horizontes más profundos Bt₂, BC y C se observa una disminución notoria de los valores de CIC, llegando nuevamente a valores entre 27 y 35 cmol Kg⁻¹. Resulta también interesante constatar la coincidencia entre las curvas de contenido de arcilla y las de CIC en estos horizontes más profundos de los perfiles de bajo y cresta de los suelos de Castelar y Los Hornos.

Estos resultados encontrados coinciden con los descritos por Cumba et al. (2005), quienes observaron que los Argiudoles vérticos tienen valores promedios de CIC de 26 cmol Kg⁻¹ y los Vertisoles valores promedios de 31,6 cmol Kg⁻¹. Esto estaría indicando que el comportamiento físico-químico de los perfiles de Los Hornos y Castelar correspondería a la familia de los Vertisoles, en consonancia como el modelo propuesto.

5.4.5-Potasio intercambiable

Si bien los contenidos absolutos de K_i son reducidos, los contenidos absolutos (Figura 28) permiten distinguir los tres suelos, observándose también diferencias entre

las posiciones de bajo y cresta de cada perfil. El suelo de La Paz es el que menor contenido de Ki presenta de los tres suelos en toda su profundidad ($<1 \text{ cmol Kg}^{-1}$) En los dos perfiles de este suelo se constata una disminución de Ki en los horizontes intermedios, seguido de un ligero incremento en los niveles más profundos. El suelo de Castelar presenta contenidos intermedios respecto a los otros dos suelos, y una disminución en la parte superior y media del horizonte Bt similar a la del suelo de La Paz. El suelo de Los Hornos presenta contenidos algo superiores de Ki respecto a los otros dos suelos, particularmente considerando el perfil del bajo. De manera equivalente a los otros suelos, también en el suelo de Los Hornos podría considerarse una disminución del contenido de Ki en el Bt, más cerca de la superficie en el perfil de cresta y a mayor profundidad en el perfil del bajo.

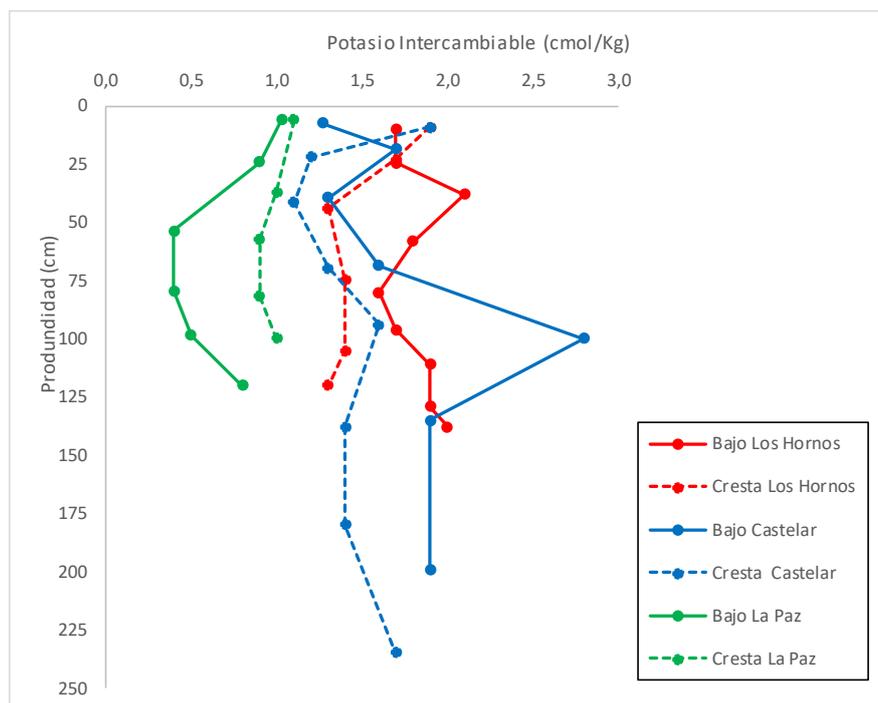


Figura 28- Variación del contenido de potasio de intercambio con la profundidad de los suelos estudiados.

Por un lado, la disminución observada en el Ki en los horizontes intermedios (Bt, BA y AC según los perfiles) parece relacionarse con el incremento relativo de componentes esmectíticos respecto a los illíticos en esos niveles. Por otro lado, estos resultados de Ki en valor absoluto y en relación a la CIC coinciden en términos generales a los encontrados por Morrás & Cruzate (2002). Estos autores, estudiando la distribución de los contenidos de Ki encontraron que en la Pampa Ondulada los mayores contenidos se encontraban en los Argiudoles típicos situados en el centro y el oeste de la región, en tanto hacia el este, en los suelos vérticos vecinos al eje fluvial Paraná-Río de la Plata los contenidos de Ki son más reducidos, lo que estaría en relación con una menor proporción de minerales potásicos en el material parental de estos suelos. En el caso presente, el valor relativamente más reducido de Ki en el suelo de La Paz sería también consistente con la mayor proporción de esmectitas y menor de illitas en su fracción arcilla respecto a los otros dos suelos, y con las interpretaciones sobre el origen y composición del material parental de Vertisoles y suelos vérticos de la cuenca del Paraná (Morrás, 2020; Morrás et al., 2023).

5.5 Retención de agua

5.5.1-Agua de saturación

En la Figura 29 se observa que en el horizonte superficial el suelo de La Paz es el que presenta mayor valor de agua de saturación (66,6 %), el suelo de Los Hornos presenta valores intermedios (55-60%) y el suelo de Castelar los valores menores (50%). En los horizontes subsuperficiales, el suelo de La Paz es también el que presenta la mayor capacidad de retención de agua de saturación, tanto en cresta como en bajo, con un ligero incremento de los valores hacia la base de los perfiles. Por su parte, los suelos de Los Hornos y Castelar, en los horizontes subsuperficiales, presentan valores similares de agua

de saturación, incluyendo un ligero aumento hacia el metro de profundidad. A partir de allí, en los niveles inferiores del suelo de Castelar se observa una ligera disminución de este parámetro.

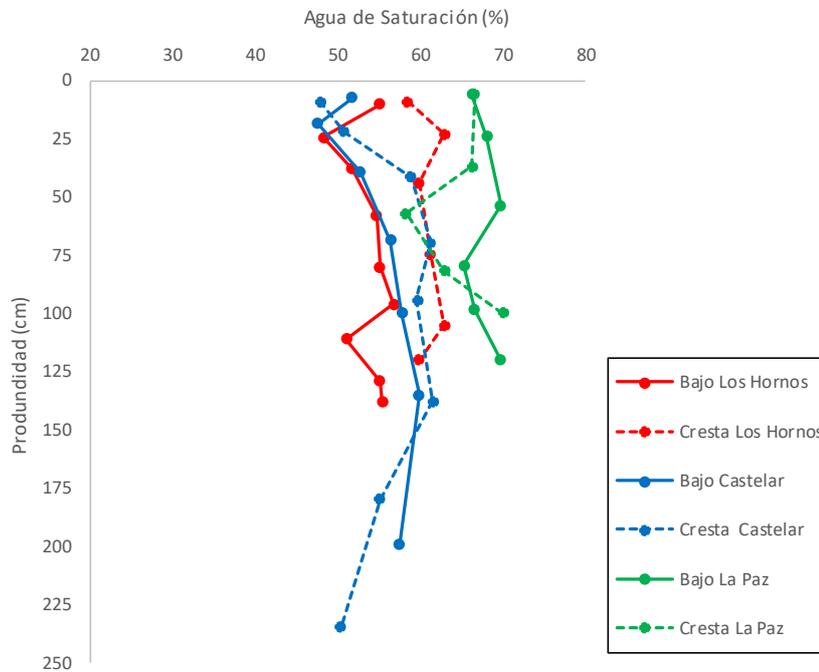


Figura 29- Variación del contenido de agua de saturación con la profundidad de los suelos estudiados.

5.5.2-Humedad equivalente

En los horizontes superficiales, el comportamiento de los tres suelos respecto a la humedad equivalente (Figura 30) es similar al observado para el agua de saturación, esto es: los mayores valores se presentan en los perfiles de La Paz (40%), valores intermedios en bajo y cresta de Los Hornos (29-37%) y los valores menores aparecen en Castelar (22%). En los horizontes subsuperficiales, si bien se mantiene la relación anterior, puede distinguirse el comportamiento del suelo de La Paz de los otros dos suelos. En La Paz se observa un incremento progresivo de los valores de humedad equivalente en una curva sinusoidal, con poca diferencia entre cresta y bajo, alcanzando valores notables (entre 60-

70%) en la base de los perfiles. Por el contrario, en Los Hornos, y particularmente en Castelar, la humedad equivalente aumenta progresivamente hasta un máximo en la parte media de los horizontes Bt, aproximadamente a los 75 cm de profundidad (50% en Castelar y 40% en Los Hornos). A partir de allí, los valores disminuyen con la profundidad, y en el caso de Castelar los valores se estabilizan en alrededor de un 36%.

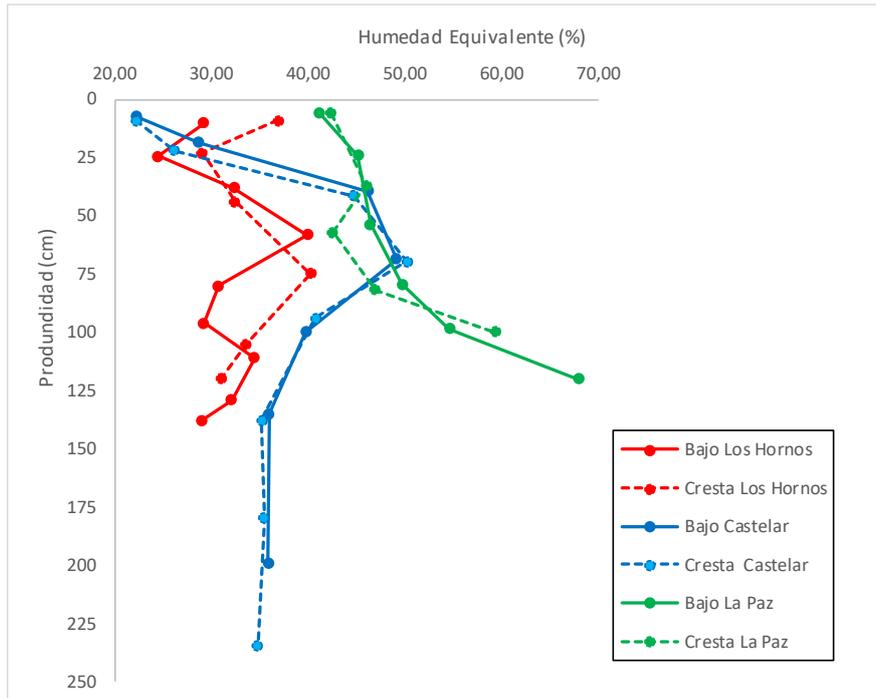


Figura 30- Variación de la humedad equivalente con la profundidad de los suelos estudiados.

5.5.3- Capacidad de campo

La variación de la capacidad de campo (CC) en horizontes seleccionados de los perfiles estudiados se puede observar en la Figura 31. En los horizontes superficiales, si bien el horizonte A del perfil de cresta-La Paz presenta un mayor valor de CC (41%), a diferencia de la distinción más clara entre suelos obtenida con los datos de agua de saturación y humedad equivalente, en las otras muestras los valores de CC son relativamente similares entre sí (entre 30 y 35%). Además, es notoria una fuerte disminución de la CC en las muestras de la parte inferior del horizonte A de los dos

perfiles del suelo de Castelar, a unos 23 cm de profundidad. Por otro lado, y en términos generales, la relación descrita para los valores de humedad equivalente en los horizontes sub-superficiales de los tres suelos se presenta también con los datos de la determinación de la CC, esto es: entre los suelos de La Paz y de Castelar, en los horizontes sub-superficiales y particularmente en su tramo superior, los valores son relativamente similares. Debe notarse que la CC en esos horizontes alcanza valores de 40-45%, mientras que la humedad equivalente tuvo valores algo superiores, que oscilan entre 45-50%. Por su parte, el suelo de Los Hornos –y con excepción del horizonte BA de la cresta- presenta valores de CC inferiores a los otros dos suelos; así, tomando como referencia las muestras de bajo y cresta situadas a unos 75 cm de profundidad (figura 25) correspondientes al horizonte Bt, la CC es de solo un 33%.

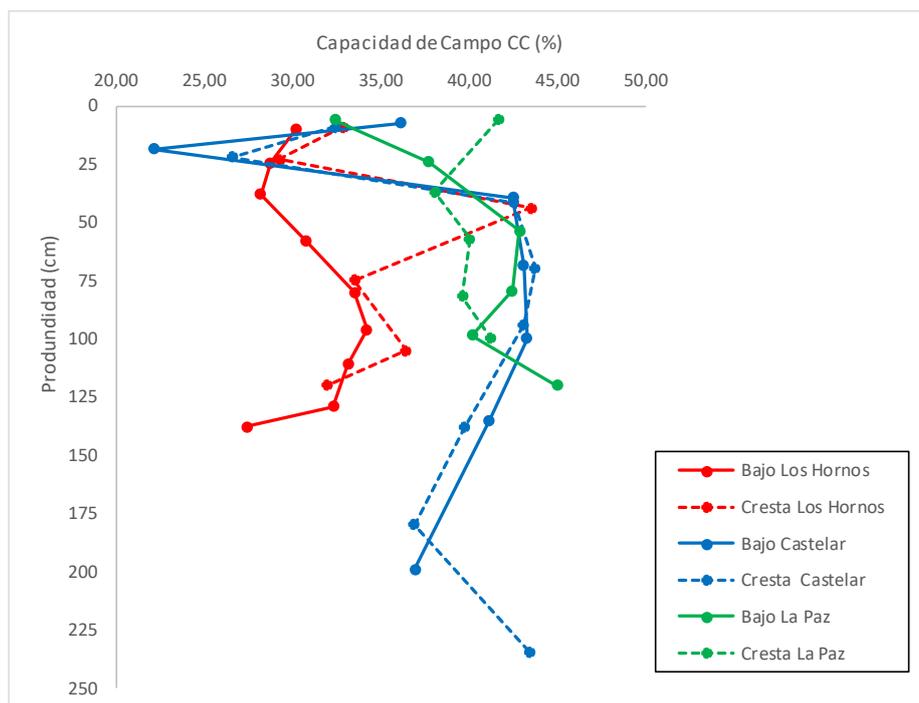


Figura 31 - Variación de la capacidad de campo con la profundidad de los suelos estudiados.

Considerando los suelos individualmente, en el suelo de La Paz el tramo medio del perfil de bajo (horizontes Bt₂ y Bt₃) la CC es superior al tramo medio de la cresta

(horizontes AC₁ y AC₂), lo que replica la diferencia observada en los datos de humedad equivalente. En el suelo de Castelar, los valores de CC entre cresta y bajo son similares en toda la profundidad de los perfiles, tal como se observó con la humedad equivalente y también con el agua de saturación. Por su parte, en el suelo de Los Hornos la cresta presenta valores de CC mayores que el perfil del bajo, en cierta coincidencia con los datos de humedad equivalente y agua de saturación.

5.5.3-Punto de marchitez permanente

En los horizontes superficiales, la retención de agua en el punto de marchitez permanente (PMP) oscila entre 25 y 31%, con la excepción del bajo del perfil de La Paz que tiene un valor de (14 %), lo que parece ser un dato anómalo (Figura 32). Como se observó con la CC, aquí también resultan notorios los menores valores de la porción inferior del horizonte A en los dos perfiles del suelo de Castelar. Por otra parte, en los horizontes sub-superficiales la variación de los valores del PMP entre suelos y entre perfiles de un mismo suelo presenta características similares a las observadas en las determinaciones de humedad equivalente y CC. Así, los horizontes Bt de los suelos de La Paz y Castelar presentan valores más elevados, que oscilan entre 30-35%, repitiéndose aquí la similitud de valores entre cresta y bajo en Castelar y una leve diferencia entre cresta y bajo de La Paz. En el caso del suelo de Los Hornos, los valores de PMP son algo inferiores a los otros suelos, con la excepción de un valor muy elevado (alrededor de 38%) obtenido en el horizonte BA del perfil de cresta.

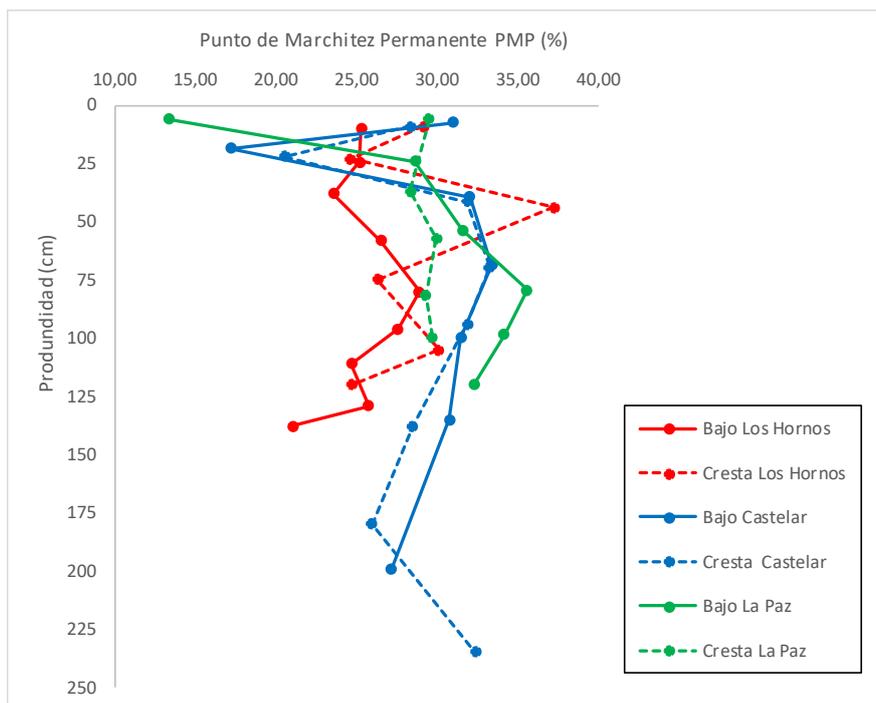


Figura 32- Variación del punto de marchitez permanente (PMP) con la profundidad de los suelos estudiados

En síntesis, los parámetros de retención hídrica analizados muestran diferencias marcadas tanto entre los distintos suelos como entre los perfiles de cresta y bajo de cada suelo. Por un lado, en términos generales, considerando conjuntamente los dos perfiles y todos los horizontes de cada suelo y los resultados de los distintos parámetros analizados, el suelo de La Paz es que el presenta mayor capacidad de retención hídrica, el suelo de Castelar presenta una capacidad intermedia, y el suelo de Los Hornos tiene una capacidad de retención menor. Esta distinción es más clara observando los datos de humedad equivalente, pero menos evidente con las otras determinaciones.

Considerando solo los resultados en los horizontes A, esta relación general mencionada anteriormente solo se observa parcialmente en los datos de CC, pero no con las otras determinaciones, indicando que los determinantes y componentes de la porosidad son más variados en este nivel superficial. En los horizontes sub-superficiales

intermedios (aproximadamente entre los 30 y 100 cm de profundidad), los valores de humedad equivalente, CC y PMP del suelo de Castelar son similares e incluso ligeramente superiores a los de La Paz. Entre estas profundidades, y con excepción del horizonte BA del perfil de cresta, el suelo de Los Hornos es el de menor capacidad de retención hídrica. Finalmente, comparando los horizontes en la base de los perfiles (aproximadamente entre los 120-150 cm de profundidad), los datos de las distintas constantes muestran que la capacidad de retención hídrica está más claramente en el orden: La Paz > Castelar > Los Hornos. Estos resultados permiten constatar también a través de estos parámetros físicos una diferenciación entre los materiales parentales de los tres suelos. Los cambios respecto a esta secuencia que se manifiestan en los horizontes suprayacentes indican modificaciones en la composición de la matriz y organización de la porosidad en función de los procesos pedogenéticos ocurridos en cada suelo.

Por otro lado, los parámetros hidrofísicos determinados -y en coincidencia con las diferencias composicionales presentadas anteriormente- ponen también en evidencia las diferencias de comportamiento entre los perfiles de cresta y bajo de cada suelo. Considerando los datos de agua de saturación, en La Paz y Los Hornos los mayores valores se presentan en los perfiles de bajo, en tanto en el suelo de Castelar los mayores valores se presentan en la cresta. Debe notarse que este parámetro tiene una utilidad relativa dado el componente de subjetividad del operador. Por el contrario, de acuerdo a los datos de humedad equivalente, CC y PMP en términos generales se observa que en el suelo de La Paz los mayores valores de retención de agua se presentan en el perfil de bajo, en el suelo de Los Hornos los mayores valores se presentan en el perfil de cresta, y en el suelo de Castelar los valores son muy similares entre cresta y bajo.

5.6 Porosidad

La porosidad total, obtenida a partir de la determinación de la densidad aparente, (Figura 33) presenta diferencias marcadas entre suelos y entre los perfiles de cresta y bajo de cada suelo. En los horizontes superficiales, el suelo de La Paz presenta los mayores valores (valores máximos alrededor del 60%) en tanto en los perfiles de Los Hornos y Castelar la porosidad total es algo menor (valores máximos alrededor del 55%). En los horizontes sub-superficiales, lo evidente son las marcadas oscilaciones de este parámetro, con disminuciones e incrementos que se dan a distintas profundidades según los suelos. A partir de la superficie, en todos los perfiles se observa una fuerte disminución de la porosidad total en la base del horizonte A / techo del B. Luego se observa un incremento en la parte media y baja de los horizontes Bt, y finalmente –hacia los 125 cm de profundidad - se observa que el bajo-La Paz es el de mayor porosidad total (58,8%), el bajo-Castelar presenta valores intermedios (55,0%), y el bajo-Los Hornos presenta el menor valor (52,3%). Por otro lado, resulta interesante constatar que, en los tres suelos, los perfiles de cresta presentan porosidades totales superiores a sus correspondientes perfiles de bajo.

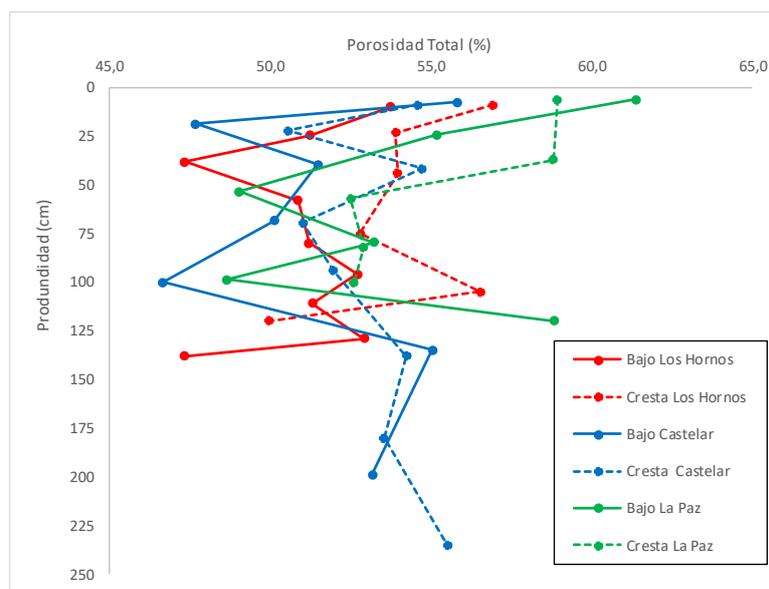


Figura 33 - Variación de la porosidad total con la profundidad en los suelos estudiados.

Los macroporos constituyen la fracción de menor volumen de la porosidad en los tres suelos. Respecto a la distribución de macroporos con la profundidad (Figura 33 y Tabla 4, ver ANEXO), y a partir de valores máximos en los horizontes superficiales en los tres suelos (que en general oscilan entre 13 y 20%, salvo un valor de 28% en el bajo-La Paz), se constata una abrupta disminución a partir del techo del primer horizonte subsuperficial. Así, en los horizontes intermedios e inferiores (recuadro en la figura N°34) se observan valores reducidos que -salvo algunos valores mayores de Los Hornos y La Paz- en general oscilan entre 1 y 10%. Considerando esos horizontes subsuperficiales de cresta y bajo en conjunto, la proporción de macroporos es mayor en el suelo de Los Hornos (alrededor de un 9%) que en La Paz (5,5 %) y que en Castelar (3,5%). Por otro lado, y también en términos generales, se observa que la proporción de macroporos es mayor en los perfiles de cresta que en los perfiles de bajo.

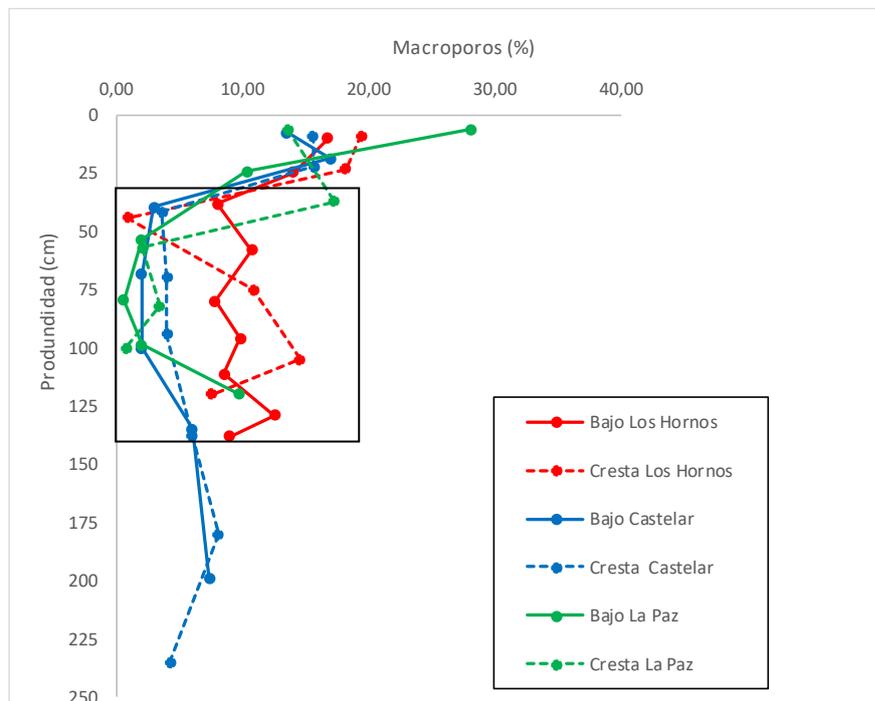


Figura 34- Variación del porcentaje de macroporos con la profundidad de los suelos estudiados.

Respecto a los mesoporos, esta fracción constituye un porcentaje intermedio del volumen poral, con una gran variabilidad con la profundidad y entre los perfiles de cresta y bajo (Figura 35). Tomando en conjunto los perfiles completos de cresta y bajo, su proporción es claramente mayor en La Paz. Considerando solo los horizontes subsuperficiales enmarcados en el recuadro de la figura 35, en La Paz la proporción promedio de los dos perfiles es de 12% del volumen total del suelo, con valores que oscilan entre 8 y 15 %. Por el contrario, en Castelar y Los Hornos la proporción de mesoporos es menor (en términos generales alrededor de un 9%), con valores que oscilan entre 5 y 13 %. Por otro lado, en Castelar y Los Hornos la proporción de mesoporos es mayor en los perfiles de cresta que en los de bajo. En el caso de La Paz esa misma relación se da en los horizontes más superficiales pero se invierte en los horizontes inferiores.

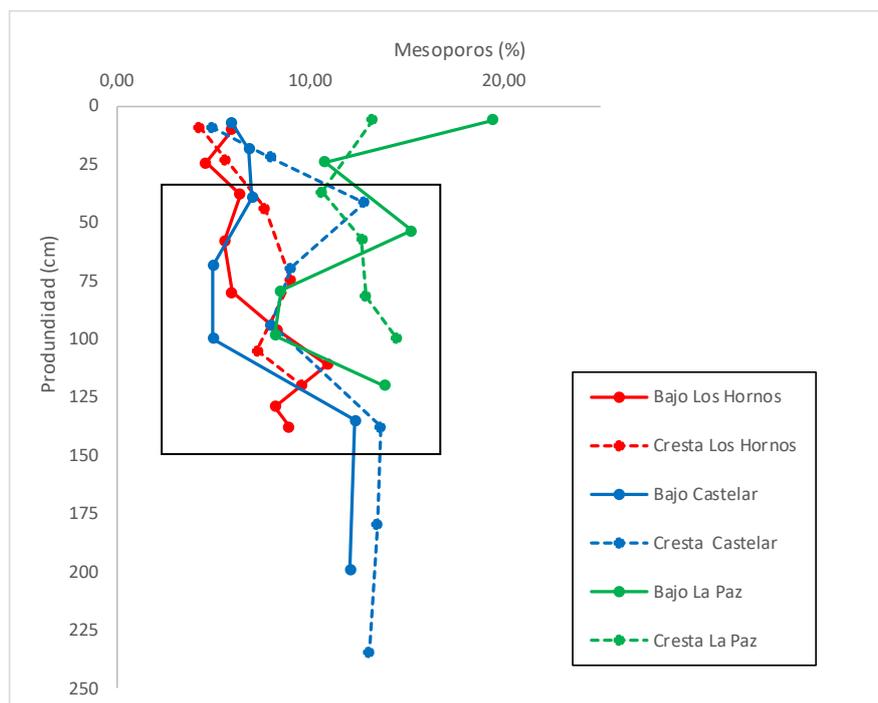


Figura 35 - Variación del porcentaje de mesoporos con la profundidad de los suelos estudiados.

Finalmente, en cuanto a los microporos, esta fracción de la porosidad es la más abundante, representando en general entre 35 y 40 % del volumen de los suelos. En general, la relación de microporos entre los suelos estudiados es inversa a la obtenida

respecto a los macroporos. En los horizontes situados en el sector intermedio e inferior de los perfiles (recuadro en la Figura 36), los valores son muy oscilantes, pero considerando el valor promedio de esos horizontes de cresta y bajo la relación sería Castelar (39%) > La Paz (36,5%) > Los Hornos (35%).

Por otro lado, comparando entre sí los perfiles de cada suelo, y considerando los valores promedio de los horizontes subsuperficiales, se observa que en Castelar y La Paz las diferencias en la proporción de microporos entre los perfiles de cresta y bajo son mínimas, en tanto que en el suelo de Los Hornos el porcentaje de microporos es algo mayor en la cresta que en el bajo.

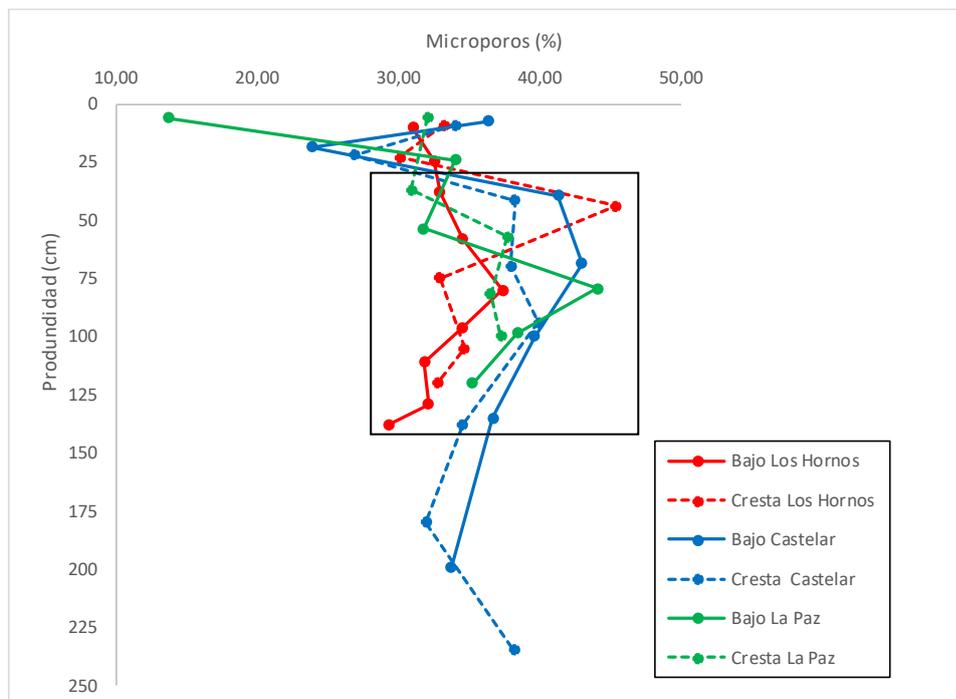


Figura 36 - Variación del porcentaje de microporos con la profundidad de los suelos estudiados.

En síntesis, y generalizando los datos de los dos perfiles de cada suelo y de los distintos horizontes, los resultados obtenidos se podrían resumir de la siguiente manera: el suelo de la Paz es el que presenta mayor porosidad total, unido además a un mayor porcentaje relativo de mesoporos que en los otros suelos. El suelo de Castelar presenta

una porosidad total intermedia caracterizada por una proporción relativamente mayor de microporos que en los otros suelos. Por su parte el suelo de Los Hornos tiene la menor porosidad total, pero es el suelo que tiene el mayor porcentaje relativo de macroporos.

También, y más sintéticamente:

PT La Paz (mesoporos) > PT Castelar (microporos) > PT Los Hornos (macroporos).

Por otro lado, en los tres suelos los perfiles de cresta presentan porosidades totales superiores a sus correspondientes perfiles de bajo. En términos generales, y de manera más clara en los suelos de La Paz y Castelar, esto se relaciona con una mayor proporción de macroporos y mesoporos en los perfiles de cresta que en los perfiles de bajo.

5.7 Contracción-Expansión

5.7.1 Coeficiente de extensibilidad lineal

El coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), es un parámetro que permite caracterizar la magnitud del proceso de expansión-contracción del suelo y expresa su capacidad de cambiar de volumen. Los resultados obtenidos ponen en evidencia claras diferencias en la capacidad de expansión entre los suelos aquí estudiados.

Así, el suelo de La Paz, y tanto en el perfil del bajo como la cresta, presenta valores de COLE que representan una capacidad de expansión-contracción muy alta desde la superficie (Figura 37 y Tabla 4). Por un lado, estos valores son relativamente constantes con la profundidad. Por otro lado, se observa valores numéricos ligeramente mayores en el perfil de bajo que en el de cresta. Debe notarse que la diferencia en el COLE entre ambos perfiles se correlaciona en mayor o menor grado con las diferencias encontradas entre bajo y cresta de este suelo con otras variables físicas tales como % de arcilla, CC y PMP

Por otro lado, los suelos de Castelar y Los Hornos se diferencian de La Paz por presentar variaciones marcadas del COLE en función de la profundidad. Así, a partir de valores de COLE que representan una capacidad moderada de expansión-contracción en el horizonte A de ambos suelos (Figura 37 y Tablas 5 y 6) se constata un incremento de los valores de este parámetro en los horizontes BA y Bt que alcanzan la categoría de muy alta capacidad de expansión-contracción. No obstante, también resulta evidente la diferencia existente entre Castelar y Los Hornos en los valores de COLE en esos horizontes intermedios. Es así que el suelo de Castelar presenta valores numéricamente más elevados, que alcanzan en las muestras situadas hacia los 75 cm de profundidad los mismos valores que el suelo de La Paz. También, en los suelos de Castelar y Los Hornos (y a diferencia de La Paz) se constata una disminución del COLE en los horizontes más profundos, que en el caso de Los Hornos hace que la capacidad de expansión-contracción caiga en las categorías de alta o moderada según el perfil. Resulta de interés mencionar que estas variaciones del COLE con la profundidad se correlacionan con las variaciones también observadas en estos dos suelos con otras variables físicas tales como % de arcilla, CC y PM.

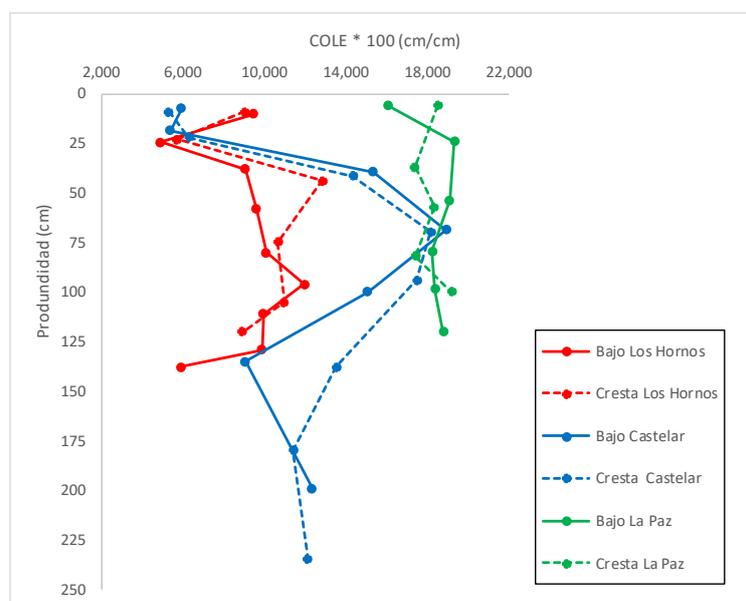


Figura 37- Variación del COLE con la profundidad de los suelos estudiados.

Finalmente, en la Figura 37 se observa que en los tres suelos los valores de COLE son muy similares entre los perfiles de cresta y baja; en el tramo superior de los horizontes B en la Paz y Castelar los valores numéricos son algo más elevados en el perfil de bajo, en tanto en Los Hornos los valores más elevados se presentan en el perfil de cresta.

Bajo del Perfil de La Paz			
Horizonte	Profundidad	COLE *100 (cm/cm)	Clase de Expansión-Constracción
A1	0 a 12 cm	16,112	Muy alta
Bt1	12 a 36 cm	19,351	Muy alta
Bt2	36 a 71 cm	19,107	Muy alta
Bkss	71 a 88 cm	18,260	Muy alta
BCkss	88 a 109 cm	18,398	Muy alta
Ckss	109 cm a piso	18,804	Muy alta
Cresta del Perfil de La Paz			
Horizonte	Profundidad	COLE *100 (cm/cm)	Clase de Expansión-Constracción
A1	0 a 12 cm	18,533	Muy alta
AC1kss	12 a 42 cm	17,385	Muy alta
AC2Kss	42 a 73 cm	18,353	Muy alta
C1Kss	73 a 91 cm	17,428	Muy alta
C2k	91 cm a +	19,225	Muy alta

Tabla 4- Variación del COLE con la profundidad de los distintos horizontes del bajo y de la cresta del suelo de La Paz y su respectiva clasificación según Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas et al. 2000).

Bajo del Perfil de Castelar			
Horizonte	Profundidad	COLE *100 (cm/cm)	Clase de Expansión-Constracción
Ap	0 a 15 cm	5,925	Moderada
A	15 a 22 cm	5,361	Moderada
Bt	22 a 57 cm	15,337	Muy alta
Btss1	57 a 80 cm	18,943	Muy alta
2Btss2	80 a 120 cm	15,093	Muy alta
2Btk1	120 a 150 cm	9,070	Alta
2Btk2	150 a 248 cm	12,333	Muy alta
Cresta del Perfil de Castelar			
Horizonte	Profundidad	COLE *100 (cm/cm)	Clase de Expansión-Constracción
Ap	0 a 18 cm	5,295	Moderada
A	18 a 26 cm	6,284	Alta
Bt	26 a 57 cm	14,358	Muy Alta
Btss1	57 a 82 cm	18,201	Muy Alta
Btss2	82 a 106 cm	17,492	Muy Alta
2Btssk	106 a 170 cm	13,531	Muy Alta
2BCK	170 a 190 cm	11,429	Muy Alta
3Btk	190 a 280 cm	12,130	Muy Alta

Tabla 5- Variación del COLE con la profundidad de los distintos horizontes del bajo y de la cresta del suelo de Castelar y su respectiva clasificación según Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas et al. 2000).

Bajo del Perfil de Los Hornos			
Horizonte	Profundidad	COLE *100 (cm/cm)	Clase de Expansión-Contracción
A1	0 a 19 cm	9,47	Muy alta
A2	19 a 30 cm	4,91	Moderada
BA	30 a 46 cm	9,07	Alta
Btss1	46 a 70 cm	9,60	Muy alta
Btss2	70 a 90 cm	10,10	Muy alta
Btss3	90 a 102 cm	11,96	Muy alta
BC1	102 a 120 cm	9,95	Muy alta
BC2	120 a 138 cm	9,87	Muy alta
2Ck	138 cm a +	5,87	Moderada
Cresta del Perfil de Los Hornos			
Horizonte	Profundidad	COLE *100 (cm/cm)	Clase de Expansión-Contracción
A1	0 a 18 cm	9,0172	Alta
A2	18 a 28 cm	5,7242	Moderada
BA	28 a 60 cm	12,8412	Muy alta
Bt1	60 a 90 cm	10,6546	Muy alta
BC1	90 a 120 cm	10,9639	Muy alta
BC2	120 cm a +	8,9186	Alta

Tabla 6- Variación del COLE con la profundidad de los distintos horizontes del bajo y de la cresta de suelo de Los Hornos y su respectiva clasificación según Soil Survey Staff (1997) (citado por Thomas et al. 2000).

5.7.2 Extensibilidad lineal

La extensibilidad lineal es otra variable utilizada para la caracterización de las propiedades de expansión-contracción de los suelos (Holmgreen, 1968). El COLE no indica orientación, por lo que puede ser usado para estimar al espacio de grietas verticales (Grossman et al., 1968). En cambio, el cálculo de la extensibilidad lineal asume la misma extensibilidad a lo largo de los ejes horizontal y vertical (Grossman et al., 1968)

Esta propiedad se utilizaba como criterio de clasificación de suelos. Así, según lo que establece la Taxonomía de Suelos (USDA, 2010) existen dos criterios para definir los subgrupos vérticos: 1- el desarrollo de grietas y caras de fricción, con ciertas características que en la Taxonomía se detallan, o; 2- una extensibilidad lineal de 6 cm o más entre la superficie del suelo y una profundidad de 100 cm.

Como puede constatare en la Tabla 7, en el suelo de La Paz los valores son máximos reflejando claramente sus propiedades expansivas y su pertenencia al orden de

los vertisoles. También resulta claro que este criterio para integrar un subgrupo vértico es cumplido ampliamente por los suelos de Castelar y Los Hornos, los que en los trabajos taxonómico-cartográficos existentes han sido clasificados como Argiudoles vérticos. Resulta además interesante notar que los valores de extensibilidad lineal son mayores en el suelo de Castelar que en el suelo de Los Hornos, en coincidencia con las diferencias encontradas entre estos dos suelos con el COLE y con los otros parámetros físicos relacionados (% de arcilla, CC y PM).

BAJO Perfil Entre Ríos			BAJO Perfil Castelar			BAJO Perfil Los Hornos		
Horizonte	Profundidad	EL	Horizonte	Profundidad	EL	Horizonte	Profundidad	EL
A1	0 a 12 cm	18,58	Ap	0 a 15 cm	14,008	A1	0 a 19 cm	9,309
Bt1	12 a 36 cm		A	15 a 22 cm		A2	19 a 30 cm	
Bt2	36 a 71 cm		Bt	22 a 57 cm		BA	30 a 46 cm	
Bkss	71 a 88 cm		Btss1	57 a 80 cm		Btss1	46 a 70 cm	
BCKss	88 a 109 cm		2Btss2	80 a 120 cm		Btss2	70 a 90 cm	
	109 cm a			120 a 150				
Ckss	piso		2Btk1	cm		Btss3	90 a 102 cm	
				150 a 248			102 a 120	
			2Btk2	cm		BC1	cm	
							120 a 138	
						BC2	cm	
						2Ck	138 cm a +	

CRESTA Perfil Entre Ríos			CRESTA Perfil Castelar			CRESTA Perfil Los Hornos		
Horizonte	Profundidad	EL	Horizonte	Profundidad	EL	Horizonte	Profundidad	EL
A1	0 a 12 cm	18,00	Ap	0 a 18 cm	13,605	A1	0 a 18 cm	10,5975
AC1kss	12 a 42 cm		A	18 a 26 cm		A2	18 a 28 cm	
AC2Kss	42 a 73 cm		Bt	26 a 57 cm		BA	28 a 60 cm	
C1Kss	73 a 91 cm		Btss1	57 a 82 cm		Bt1	60 a 90 cm	
C2k	91 cm a +		Btss2	82 a 106 cm		BC1	90 a 120 cm	
				106 a 170				
			2Btssk	cm		BC2	120 cm a +	
				170 a 190				
			2BCK	cm				
				190 a 280				
			3Btk	cm				

Tabla 7- Valores de extensibilidad lineal (EL) calculados para los 100 cm de profundidad del bajo y de la cresta de los suelos de La Paz, Castelar y Los Hornos.

5.8 Análisis estadístico

El análisis de componentes principales se dividió en dos:

- 1) Primero se realizó un análisis que incluyó las siguientes variables: contenido de fósforo, contenido de Ki, pH en agua, contenido de CO, CIC, porcentaje de arcilla, porcentaje de limo, porcentaje de arena y susceptibilidad magnética.
- 2) A continuación, a fin de evaluar la interrelación entre las propiedades físicas estudiadas en los suelos seleccionados, el análisis de componentes principales incluyó las siguientes variables: agua de saturación, CC, PMP, humedad equivalente, COLE, porosidad total y porcentaje de macroporos, mesoporos y microporos sobre la porosidad total.

Para identificar a los perfiles se utilizaron las siguientes siglas:

- Perfil de La Paz cresta (LPC)
- Perfil de La Paz bajo (LPB)
- Perfil de Castelar cresta (CC)
- Perfil de Castelar bajo (CB)
- Perfil de Los Hornos cresta (LHC)
- Perfil de Los Hornos bajo (LHB)

5.8.1 Primer análisis de componentes principales

Para poder realizar un mejor análisis de componentes principales de las variables estudiadas, se las agrupó por horizontes: en el primer grupo se incluyeron los horizontes Ap, A₁, A₂, AC y BA; en el segundo, los horizontes Bt₁, y en el tercero, los horizontes BC y C. Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales correspondiente a las variables estudiadas de los horizontes Ap, A₁, A₂, AC y BA, se

observó que el eje 1 explica el 72 % de la variabilidad y el eje 2 el 10 %. De esta manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 82 % de la variabilidad total.

En la Tabla 8 se representan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad está principalmente representada por: el contenido de arena, el contenido de limo, el contenido de arcilla, el valor de pH en agua, Ki, el contenido de P, la CIC, y la susceptibilidad magnética. En el eje 2 la variabilidad está principalmente representada por la susceptibilidad magnética y la CIC

Por lo mencionado, las propiedades que aportan mayor variabilidad para estos horizontes son las relacionadas con la granulometría, la susceptibilidad magnética, el CIC, el contenido de potasio, y el contenido de fósforo.

Autovectores				
Variables	e1	e2	CP 1	CP 2
Arcilla	-0,37***	0,09	0,00000011	0,76
Limo	0,38***	-0,2	0,00000015	0,52
Arena	0,38***	0,09	0,000000039	0,76
CIC	-0,31***	0,48	0,00092	0,1
SM	0,31***	0,51*	0,00089	0,08
pH	-0,36***	0,05	0,000008	0,86
CO	0,24**	-0,48	0,02	0,1
Ki	0,31***	0,23	0,00079	0,44
P	-0,31***	-0,42	0,00067	0,16

Tabla 8- Autovectores de los componentes principales de los horizontes Ap, A₁, BA y AC de los suelos estudiados. (* p < 0,1; ** p < 0,05; *** p < 0,01). SM= susceptibilidad magnética.

En la Figura 38 se observa cómo quedaron distribuidos en los ejes 1 y 2 los horizontes de este primer grupo y las variables estudiadas. A la izquierda de dicha figura se observa que se agrupan los horizontes LPC A₁, LPC AC₁kss, LPC ACkss y LPB A₁ correspondientes al sector bajo y cresta del perfil de La Paz, en Entre Ríos. Esto se debe

en relación con el mayor porcentaje de arcilla y valor de pH del eje 1 y mayores contenidos de fósforo y valores de CIC del eje 2. En cambio, a la derecha de la figura se agrupan los horizontes LHB A₁, LHB A₂, LHB BA, LHC A₁, LHC A₂, LHC BA, CC Ap, CC A, CB Ap y CB correspondientes al bajo y a la cresta de los perfiles de Los Hornos y Castelar. Los mismos están fuertemente condicionados por los contenidos de arena y limo del eje 1 y los mayores valores de SM, contenido de potasio del eje 2.

Claramente, en la Figura 38 se observa que los horizontes superficiales del perfil de La Paz son muy diferentes a los horizontes superficiales de los perfiles de Los Hornos y Castelar. Lo anteriormente descrito concuerda con Morrás et al. (2023), quienes encontraron que los Vertisoles que se formaron en la Pampa Ondulada fueron sepultados por otro material parental más illítico, y expresión de las propiedades vérticas de dicho suelo variará dependiendo del espesor de este depósito.

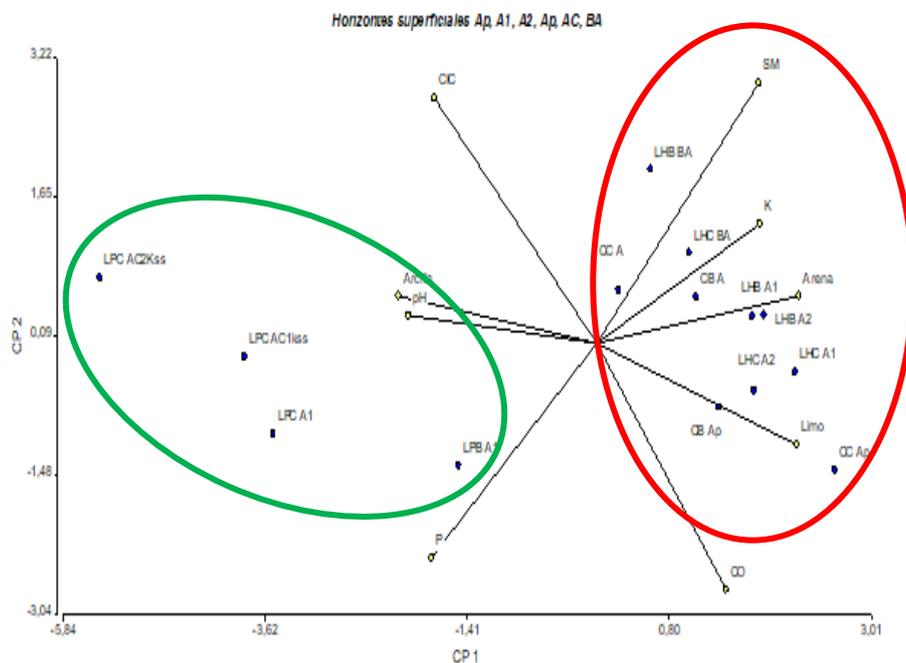


Figura 38- Componentes Principales de los horizontes Ap, A₁, BA y AC de los suelos estudiados.

En la Tabla 9 se representa los coeficientes de correlación de Pearson para las variables estudiadas en los horizontes Ap, A₁, BA y AC. De acuerdo a su análisis surge que las variables más vinculadas entre sí son: porcentaje de arcilla y CIC, porcentaje de arcilla y pH, susceptibilidad magnética y porcentaje de arena, susceptibilidad magnética y Ki, susceptibilidad magnética y contenido de P, porcentaje de limo y arena, porcentaje de arena y Ki, y pH en agua con contenido de fósforo.

Correlación de Pearson:
Coeficientes\probabilidades

	Arcilla	Limo	Arena	CIC	SM	pH	CO	K	P
Arcilla	1	0,000000011	0,00000033	0,000049	0,01	0,00066	0,07	0,0025	0,01
Limo	-0,97***	1	0,0000012	0,000058	0,01	0,000043	0,02	0,01	0,01
Arena	-0,95***	0,93***	1	0,0033	0,0015	0,000031	0,06	0,0012	0,00037
CIC	0,87***	-0,87***	-0,73***	1	0,19	0,01	0,08	0,04	0,17
SM	-0,70**	0,67**	0,76***	-0,38	1	0,01	0,21	0,004	0,0025
pH	0,80***	-0,87***	-0,88***	0,64**	-0,64**	1	0,01	0,03	0,00085
CO	-0,50*	0,63**	0,51*	-0,48*	0,35	-0,66**	1	0,21	0,17
K	-0,74***	0,70**	0,77***	-0,56**	0,72***	-0,59**	0,36	1	0,04
P	0,68**	-0,67**	-0,82***	0,39	-	0,74***	-0,38	-0,55**	1

Tabla 9- Coeficientes de correlación de Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Ap, A₁, A₂, AC y BA de los suelos estudiados. (* p < 0,1; ** p < 0,05; *** p < 0,01). SM= susceptibilidad magnética.

Estas correlaciones encontradas entre las distintas variables demuestran nuevamente la presencia de dos materiales parentales muy distintos en los horizontes superficiales. Observando los horizontes superficiales de los perfiles de Los Hornos y Castelar vemos que tienen mayores contenidos de arena y limo, mayor susceptibilidad magnética, mayor contenido de potasio y menor valores de pH. En cambio, el perfil de La Paz tiene mayores contenidos de arcilla, mayor valor de CIC, mayor contenido de fósforo y mayor valor de pH. Esto concuerda con lo descrito por Bressan (2013) quien

encontró diferencias de dichas variables en diferentes perfiles de la Pampa Ondulada, atribuyendo esto a la presencia de diferentes materiales parentales a partir de los cuales se formaron dichos suelos. Así, también esta distinta ubicación de estas dos agrupaciones de los horizontes de La Paz respecto a los horizontes de los perfiles de Castelar y Los Hornos concuerda con lo descrito por Morrás et al. (2023), quienes encontraron que la disminución de la susceptibilidad magnética se debería parcialmente a la presencia de altos contenidos de carbonato de calcio, que es diamagnético. Se comprueba esto en dichos horizontes, ya que presentan los mayores valores de pH (asociado a la presencia de carbonato de calcio) y menores valores de susceptibilidad magnética.

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales correspondiente a las variables estudiadas de los horizontes Bt, Btss, Bk, Bkss, 2Btk y 3Btk, se observó que el eje 1 explica el 38 % de la variabilidad y el eje 2 el 27 %. De esta manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 65 % de la variabilidad total.

En la Tabla 10 se representan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad está principalmente representada por: el contenido de arcilla, CIC, el contenido de arena, pH en agua, Ki, y contenido de CO. En el eje 2, la variabilidad está principalmente representada por la susceptibilidad magnética, Ki, el contenido de P y CIC. Por lo mencionado, las propiedades que aportan mayor variabilidad para estos horizontes son las relacionadas con la granulometría, la susceptibilidad magnética, CIC, Ki, y el contenido de P.

Autovectores				
Variables	e1	e2	CP 1	CP 2
Arcilla	0,50***	-0,09	0,00000011	0,61
Limo	-0,13	-0,03	0,36	0,85
Arena	-0,42***	0,25	0,00023	0,12
CIC	0,44***	0,28*	0,000083	0,08
SM	-0,07	0,57***	0,62	0,0000012
pH	-0,41***	-0,29*	0,00049	0,07
CO	0,27**	-0,1	0,04	0,54
K	-0,27**	0,47***	0,04	0,00083
P	0,21	0,46***	0,12	0,001

Tabla 10- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Bt, Btss, Bk, Bkss, 2Btk, 3Btk de los suelos estudiados. (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$). SM= susceptibilidad magnética.

En la Figura 39 se observan claramente tres diferentes agrupamientos dependiendo de las variables más significativas para cada horizonte. A la izquierda de la figura se agrupan los horizontes CB 2Btss₂, CB 2Btk, CB 2 Btk₂, CC Btss, CC 2Btkss, CC 3Btk correspondientes al bajo y a la cresta del perfil Castelar. Esta ubicación en el eje 1 se debe con los altos contenidos de arena y valores pH (estrictamente relacionado con la presencia de carbonatos de calcio). Además, se observa que todos los horizontes aquí agrupados representan una discontinuidad litológica dentro del perfil. Por otro lado, a la derecha de la Figura 37 en la parte superior encontramos agrupados a los horizontes LHB Btss₁, LHB Btss₂, LHB Btss₃, LHC Bt del perfil de Los Hornos y los horizontes CC Btss₁ y CB Btss₁ del perfil de Castelar. Las variables que generaron dicha ubicación son los altos valores de CIC y contenido de P.

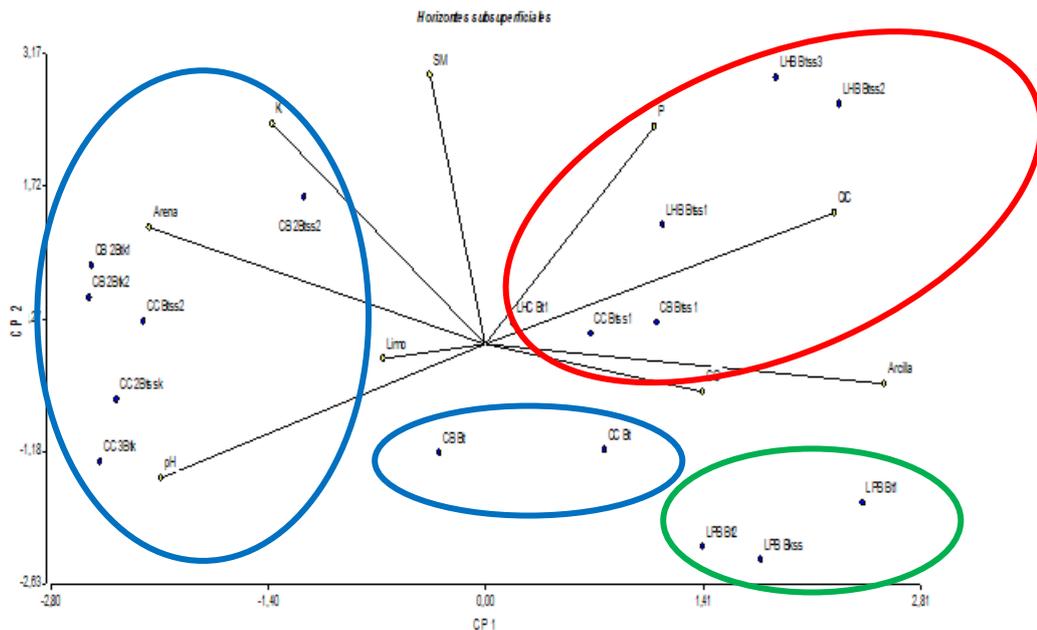


Figura 39- Componentes Principales de los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk y 3Btk de los suelos estudiados.

Por último, a la derecha de la Figura 39 pero en la parte inferior encontramos agrupados a los horizontes CB Bt y CC Bt del perfil de Castelar y los horizontes LPB Bt₁, LPB Bkss y LPB Bt₂ correspondientes al sector bajo del perfil de La Paz. Las variables que influyeron en dicho agrupamiento son los mayores contenidos de arcilla y mayores valores de carbono orgánico. Entonces se debe resaltar que en su mayoría los horizontes subsuperficiales de los 3 perfiles se diferencian entre sí. Las excepciones son los horizontes Bt del bajo y de la cresta de Castelar que se agruparon con los horizontes del bajo del perfil de La Paz y los horizontes Btss1 de la cresta y del bajo de Castelar que se agruparon con los horizontes de perfil de de Los Hornos. Esta diferencia encontrada en los horizontes subsuperficiales concuerda con el modelo propuesto para los Vertisoles de la Pampa Ondulada evidenciando la presencia de estos Vertisoles “ocultos” que presentan estructura diapírica cubiertos por un manto de sedimento eólico más illítico.

En la Tabla 11 se representa los coeficientes de correlación de Pearson para las variables estudiadas en los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk y 3Btk. De acuerdo a su análisis surge que las variables más vinculadas entre si son: porcentaje de arcilla y CIC, porcentaje de arena y contenido de potasio, CIC y contenido de fósforo, susceptibilidad magnética y contenido de potasio.

Correlación de Pearson:
coeficientes\probabilidades

	Arcilla	Limo	Arena	CIC	SM	pH	CO	Ki	P
Arcilla	1	0,1	1,70E-04	6,20E-04	0,39	0,03	0,19	0,05	0,46
Limo	-0,41	1	0,74	0,11	0,95	0,42	0,98	0,68	0,7
Arena	-0,79***	-0,09	1	0,14	0,06	0,05	0,39	0,01	0,76
CIC	0,74***	-0,41	-0,38	1	0,31	1,10E-03	0,36	0,79	0,03
SM	-0,22	-0,02	0,46*	0,26	1	0,23	0,59	0,01	0,05
pH	-0,53**	-0,21	0,48*	-0,72***	-0,31	1	0,07	0,97	0,02
CO	0,34	0,01	-0,22	0,24	-0,14	-0,45*	1	0,14	0,98
K	-0,49*	0,11	0,61**	-0,07	0,63**	0,01	-0,38	1	0,35
P	0,19	-0,1	-0,08	0,54**	0,48*	-0,57**	-0,01	0,24	1

Tabla 11- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk, 3Btk de los suelos estudiados. (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$). SM= susceptibilidad magnética.

Estas correlaciones encontradas entre las distintas variables de los horizontes subsuperficiales demuestran que tres de los perfiles se diferencian claramente debido a los contenidos de arcilla y CIC. Además, cabe destacar que las correlaciones de porcentaje de arena y de susceptibilidad magnética con el Ki concuerdan con la existencia de horizontes que indican la presencia de distintos materiales parentales a partir de los cuales se formaron estos suelos, evidenciando de esta manera el modelo propuesto que explica la existencia de Vertisoles poligenéticos.

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales de las variables estudiadas en los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck, se observó que el eje 1 explica el 57 % de la variabilidad y el eje 2 el 25 %. De esta manera se eligió utilizar

estos dos ejes, los cuales explican el 82 % de la variabilidad total. En la Tabla 12 se representan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad está principalmente representada por los contenidos de arena, limo y arcilla, la susceptibilidad magnética, Ki, CIC y pH en agua, En el eje 2 la variabilidad está principalmente representada por los contenidos de P y CO.

Autovectores				
Variables	e1	e2	CP 1	CP 2
Arcilla	-0,41***	0,23	0,0002	0,3400
Limo	0,41***	-0,17	0,0002	0,4800
Arena	0,40***	-0,04	0,0005	0,8700
CIC	-0,30**	0,37	0,0300	0,1000
SM	0,40***	0,15	0,0004	0,5200
pH	-0,27*	-0,35	0,0600	0,1100
CO	-0,08	0,52**	0,6300	0,0100
Ki	0,40***	0,21	0,0004	0,3800
P	0,15	0,57***	0,3200	0,0013

Tabla 12- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados. (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$). SM= susceptibilidad magnética.

Por lo mencionado, las propiedades que aportan mayor variabilidad para estos horizontes son las relacionadas con la granulometría, la susceptibilidad magnética, CIC, Ki, y los contenidos de P y CO.

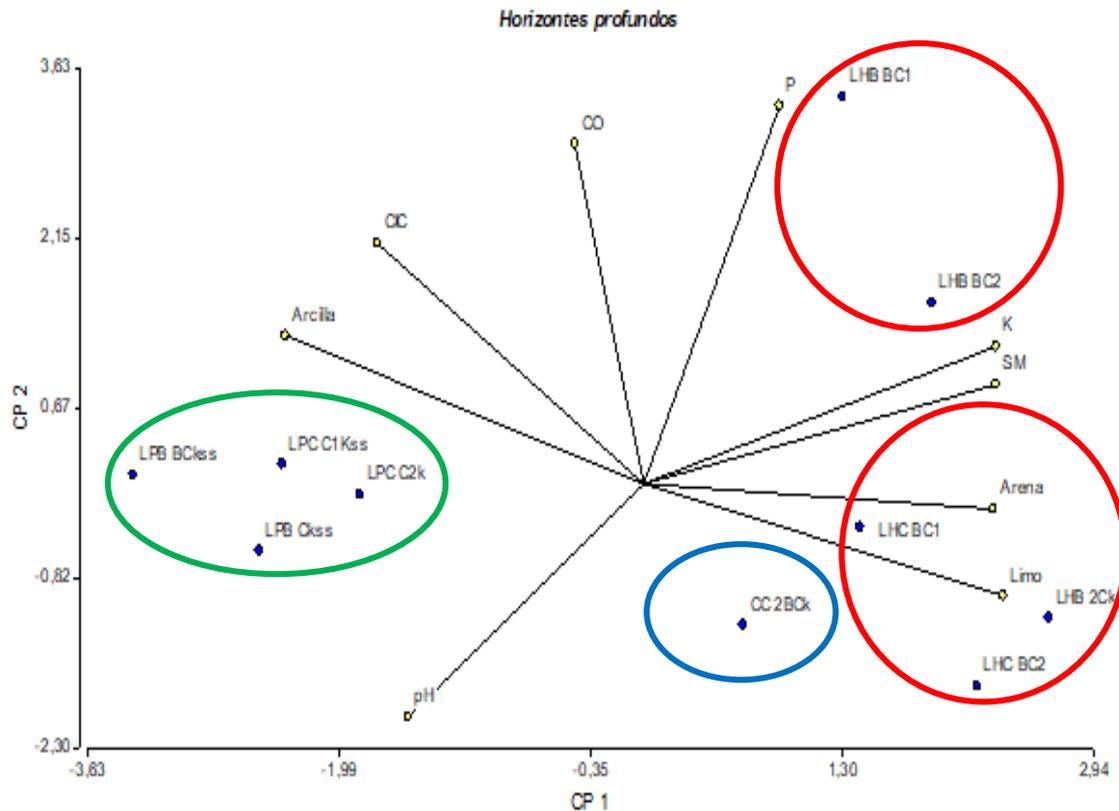


Figura 40- Componentes Principales de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2Bck y 2Ck de los suelos estudiados

En la figura 40 se observan tres agrupamientos dependiendo de las variables tanto del eje 1 como el eje 2. A la izquierda se ubica un grupo compuesto por los horizontes LPC C₁kss, LPB BCkss, LPC C₂k y LPB Ckss del perfil de La Paz, ubicados en este sector por los mayores contenidos de arcilla y pH. Luego, a la derecha, podemos ver ubicados en la parte superior a los horizontes LHB BC₁ y LHB BC₂ del perfil de Los Hornos, debido a los mayores contenidos de P, Ki y valores de susceptibilidad magnética. Por último, a la derecha, pero en la parte inferior podemos ver los horizontes LHC BC₁, LHB 2Ck, LHC BC₂ del perfil de Los Hornos y el horizonte 2Bck del perfil del Castelar, dispuestos en este sector por los mayores contenidos de arena y limo. Este agrupamiento se podría atribuir a las diferencias existentes de material parental en los tres perfiles. Esto

concuerta con las diferencias anteriormente descritas en los resultados granulométricos y mineralógicos.

En la Tabla 13 se representan los coeficientes de correlación de Pearson para las variables estudiadas en los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck. De acuerdo a su análisis surge que las variables más vinculadas entre sí son: porcentaje de arcilla y CIC, porcentaje de limo y susceptibilidad magnética, porcentaje de arena y Ki, y susceptibilidad magnética y Ki.

Correlación de Pearson:
coeficientes\probabilidades

	Arcilla	Limo	Arena	CIC	SM	pH	CO	K	P
Arcilla	1	5,50E-04	2,3E-04	2,0E-03	0,03	0,47	0,33	0,01	0,87
Limo	-0,89***	1	0,02	0,02	1,8E-03	0,11	0,24	0,02	0,94
Arena	-0,91***	0,72**	1	0,03	0,03	0,36	0,78	4,5E-03	0,34
CIC	0,85***	-0,70**	-0,70**	1	0,31	0,99	0,35	0,15	0,6
SM	-0,69**	0,85***	0,69**	-0,36	1	1,6E-03	0,75	4,8E-03	0,23
pH	0,26	-0,54	-0,33	-3,3E-03	-0,86***	1	0,79	0,09	0,11
CO	0,34	-0,41	-0,1	0,33	-0,12	-0,1	1	0,68	0,08
K	-0,76**	0,73**	0,81***	-0,49	0,81***	-0,56*	0,15	1	0,05
P	-0,06	0,03	0,34	0,19	0,42	-0,54	0,58*	0,64*	1

Tabla 13- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados. (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$). SM= susceptibilidad magnética.

Estas correlaciones encontradas entre las distintas variables demuestran que los horizontes más profundos de los tres perfiles no se asemejan debido a los contenidos de arena, limo y valores de susceptibilidad magnética evidenciando el desarrollo de los mismos a partir de distintos materiales parentales. Por otro lado, cabe destacar que las diferencias encontradas entre los horizontes de la cresta y del bajo del perfil de Los Hornos se debería al elevado contenido fósforo que estaría influencia fuertemente en la separación de los mismos.

5.8.2 Segundo análisis de componentes principales

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales, correspondiente a las variables estudiadas de los horizontes Ap, A₁, A₂, AC y BA, se observó que el eje 1 explica el 50 % de la variabilidad y el eje 2 el 33 %. De esta manera, se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 83 % de la variabilidad total.

En la Tabla 14 se representan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad está principalmente representada por porcentaje de agua de saturación, COLE, humedad equivalente, porosidad total, porcentaje de mesoporos y CC. En el eje 2, la variabilidad está principalmente representada por el porcentaje de microporos, PMP, porcentaje de macroporos y CC.

Autovectores				
Variables	e1	e2	CP 1	CP 2
Humedad equivalente	0,38***	0,0024	0,00013	0,99
COLE	0,40***	0,1	0,000016	0,54
Porosidad Total	0,38***	-0,06	0,000076	0,69
Macroporos	0,08	-0,49***	0,56	0,00003
Mesoporos	0,35***	-0,18	0,00074	0,26
Microporos	-0,06	0,54***	0,62	0,00000000048
CC	0,32***	0,37***	0,0045	0,01
PMP	0,06	0,53***	0,66	0,00000022
Agua de saturación	0,41***	-0,01	0,0000033	0,96

Tabla 14- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes A₁, A₂, AB y BA de los suelos estudiados. (* p < 0,1; ** p < 0,05; *** p < 0,01). DAP= densidad aparente.

Por lo mencionado, las propiedades que aportan mayor variabilidad para estos horizontes son las relacionadas con la retención hídrica, la porosidad, la distribución de poros y el COLE.

En la Figura 41 se pueden observar 3 agrupamientos dependiendo de las variables que del eje 1 y del eje 2. A la izquierda del gráfico se observan que los horizontes, CC Ap, CB Ap, CC A del perfil de Castelar y los horizontes LHC A₁, LHB A₁, LHC A₂, LHB BA, LHB A₂ del perfil de Los Hornos todos agrupados por los menores valores porosidad total. Esto estaría indicando la similitud de estos dos perfiles superficialmente. En cambio, a la derecha y en la parte superior de la Figura N° 41 se observa que se agrupan el horizonte LHC BA del perfil de Los Hornos y el horizonte LPC AC₂kss del perfil de La Paz a través de los mayores valores de punto de marchitez permanente. Es destacable recalcar que ambos horizontes corresponden al sector cresta de ambos perfiles. Luego a la derecha y la parte inferior de la figura N° 35 se agrupan los horizontes LPC A₁ y LPC AC₁kss del perfil de La Paz y el LHC A₁ del perfil de los Hornos debido a los mayores valores de COLE, humedad equivalente, agua de saturación, porosidad total y porcentaje de mesoporos. Por ultimo también ubicado a la derecha y en la parte inferior de la figura 39 se ubica el horizonte LPB A₁ del perfil de La Paz lo cual está asociado a los altos valores de porcentaje de macroporos que posee. Claramente se observa que los perfiles de Los Hornos y Castelar se asemejan en superficie y se diferencian claramente de los horizontes del perfil de La Paz. Esto concuerda con las diferencias encontradas en los resultados granulométricos y mineralógicos entre los horizontes superficiales del perfil de La Paz respecto de los perfiles de Castelar y Los Hornos. Lo cual va en concordancia con el modelo propuesto para Vertisoles de la Pampa ondulada a través del cual se diferencian de los Vertisoles de la Pampa Mesopotámica ya que disminuyen la expresión

de sus propiedades vérticas dependiendo de la cantidad de material loésico illítico bajo del cual se encuentran enterrados.

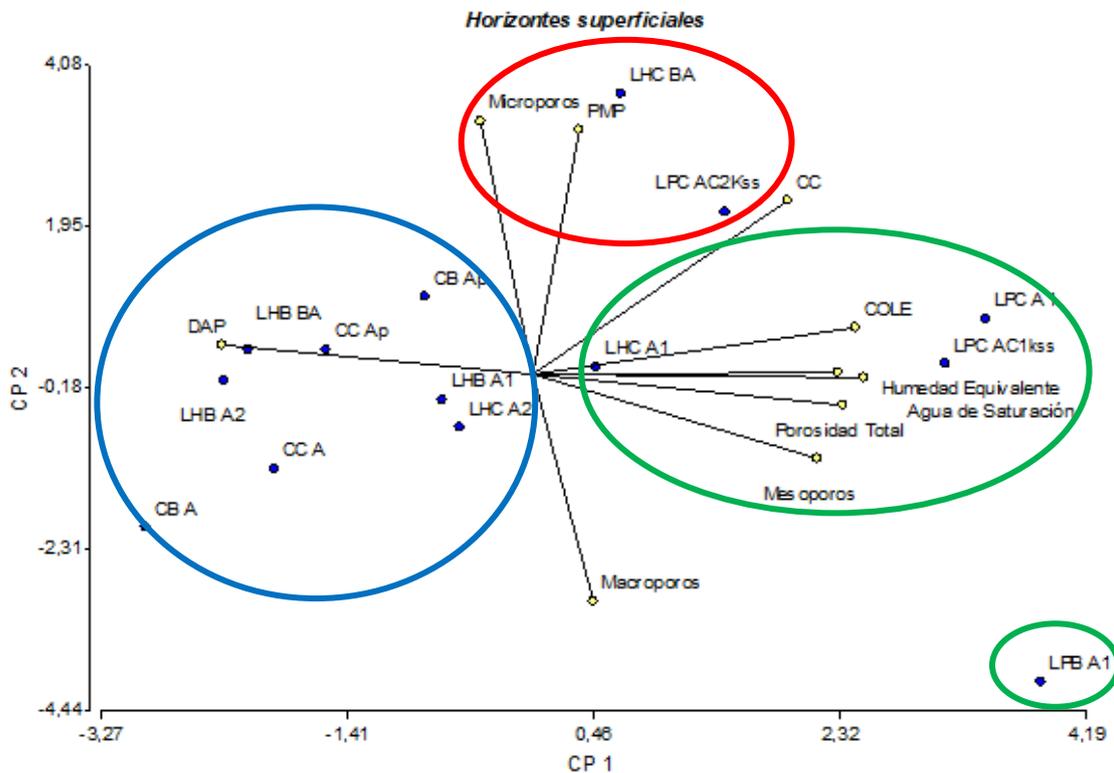


Figura 41 - Componentes Principales de los horizontes A, AB y BA de los suelos estudiados.

En la Tabla 15 se representa los coeficientes de correlación de Pearson para las variables estudiadas en los horizontes Ap, A₁, BA y AC. De acuerdo a su análisis surge que las variables más vinculadas entre sí son: humedad equivalente y COLE, humedad equivalente y porcentaje de mesoporos, COLE y porcentaje de mesoporos, porcentaje de macroporos y porcentaje de microporos, COLE y capacidad de campo, punto de marchitez permanente y porcentaje de macroporos, punto de marchitez permanente y porcentaje de microporos, punto de marchitez permanente y capacidad de campo, agua de saturación y humedad equivalente, agua de saturación y COLE, agua de saturación y porosidad total y agua de saturación y porcentaje de mesoporos.

Correlación de Pearson: coeficientes\probabilidades

	Humedad equivalente.	COLE	PT	Macro	Meso	Micro	CC	PMP	Agua de saturación.
Humedad equivalente.	1	0,0000027	0,06	0,95	0,0042	0,61	0,06	0,94	0,00037
COLE	0,92***	1	0,04	0,59	0,00073	0,99	0,0037	0,54	0,00084
PT	0,52*	0,57**	1	0,11	0,04	0,51	0,03	0,66	0,0016
Macroporos	0,02	-0,16	0,45	1	0,46	0,00016	0,1	0,01	0,53
Mesoporos	0,71***	0,79***	0,56**	0,22	1	0,08	0,2	0,24	0,01
Microporos	-0,15	0,0019	-0,19	-0,84***	-0,49*	1	0,04	0,00000036	0,65
CC	0,52*	0,72***	0,58**	-0,46	0,37	0,56**	1	0,0021	0,02
PMP	0,02	0,18	0,13	-0,69***	-0,34	0,94***	0,75***	1	0,71
Agua de saturación	0,82***	0,79***	0,76***	0,18	0,66***	-0,13	0,6**	0,11	1

Tabla 15- Coeficientes de correlación de Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Ap, A₁, A₂, AC y BA de los suelos estudiados. (* p < 0,1; ** p < 0,05; *** p < 0,01)..

Estas correlaciones encontradas entre las distintas variables demuestran que los horizontes más superficiales de los perfiles de Castelar y Los Hornos se asemejan, ya que comparten variables relacionadas con la retención. En cambio, en los horizontes del perfil de La Paz las variables que agrupan a los mismos son las relacionadas con porosidad y la expansión y contracción de agregados. Esto estaría relacionado con lo observado por Bressan (2013), quien encontró una alta relación existente entre las propiedades de retención de agua y las distintas mineralogías de arcillas presentes en suelos de la Pampa Ondulada. Se puede considerar que superficialmente los perfiles de Castelar y Los Hornos presentan un contenido alto de arcilla de tipo illita, y en cambio en el perfil de La Paz las arcillas están dominadas por minerales de tipo esmectítico.

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales, correspondiente a las variables estudiadas de los horizontes Bt, Btss, Bk, Bkss, 2Btk y 3Btk, se observó que el eje 1 explica el 45 % de la variabilidad y el eje 2 el 25 %. De esta

manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 70 % de la variabilidad total. En la Tabla 16 se representan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad esta principalmente representada por el punto de marchitez permanente, porcentaje de macroporos, CC, COLE, humedad equivalente, y porcentaje de microporos. En el eje 2 la variabilidad está principalmente representada por el porcentaje de mesoporos y porosidad total. Por lo mencionado, las propiedades que aportan mayor variabilidad para estos horizontes son las relacionadas con la retención hídrica, la porosidad, la distribución de poros y el COLE.

Autovectores				
Variables	e1	e2	CP 1	CP 2
Humedad Equivalente	0,36***	0,1	0,0003	0,56
COLE	0,37***	0,14	0,00016	0,39
Porosidad Total	-0,20*	0,50***	0,09	0,00023
Macroporos	-0,43***	-0,05	0,00000043	0,75
Mesoporos	-0,08	0,55***	0,52	0,000014
Microporos	0,34***	-0,11	0,00098	0,5
CC	0,39***	0,22	0,000023	0,18
PMP	0,43***	0,13	0,00000032	0,45
Agua de Saturación	0,1	0,29*	0,42	0,07

Tabla 16- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes Bt, Btss, Bk, Bkss, 2Btk, 3Btk de los suelos estudiados. (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$). DAP= densidad aparente.

En la Figura 42 se distinguen tres agrupaciones de los horizontes subsuperficiales de los tres perfiles estudiados. Arriba, en la parte izquierda de la Figura 42 se encuentran los horizontes CB 2Btk₁, CB 2Btk₂, CC3Btk del perfil de Castelar y el horizonte LPB Bt₁ del perfil de La Paz. Las variables que generaron dicho agrupamiento son la porosidad total y el porcentaje de mesoporos. Luego. En la parte inferior izquierda, se agrupan los horizontes LHC Bt₁, LHB Btss₁, LHC Btss₂, LHB Btss₃ del perfil Los Hornos. A diferencia del anterior, este agrupamiento se debió a la variable porcentaje de macroporos. Cabe destacar que la mayoría de estos horizontes tiene rasgos morfológicos de procesos de expansión y contracción como es la presencia de slickensides. Por otro lado, a la derecha de la figura 40 se ven agrupados los horizontes CB Bt, CB Btss₁, CB 2Btss₂, CC Bt, CC Btss₁, CC Btss₂ del perfil de Castelar y los horizontes LPB Bkss y LPB Bt₂ del perfil de La Paz. Las variables que generaron dicho agrupamiento son COLE, humedad equivalente, agua de saturación, porcentaje de microporos y CC. En comparación con los anteriores, entre este último respecto del primero se puede decir que también presenta rasgos de procesos de expansión y contracción mediante la variable de COLE, aunque se diferencia de aquél en que en este caso deben ser procesos expansión y contracción más intensos, porque hay una mayor retención de agua, evidenciado por el porcentaje de microporos. Esto coincide con lo encontrado por Bressan (2013) en suelos de la Pampa Ondulada, donde observó que la variación de los porcentajes de microporos está muy relacionada con la retención de agua y con la intensidad de los procesos de expansión y contracción que se dan por la presencia de minerales de arcilla esmectita.

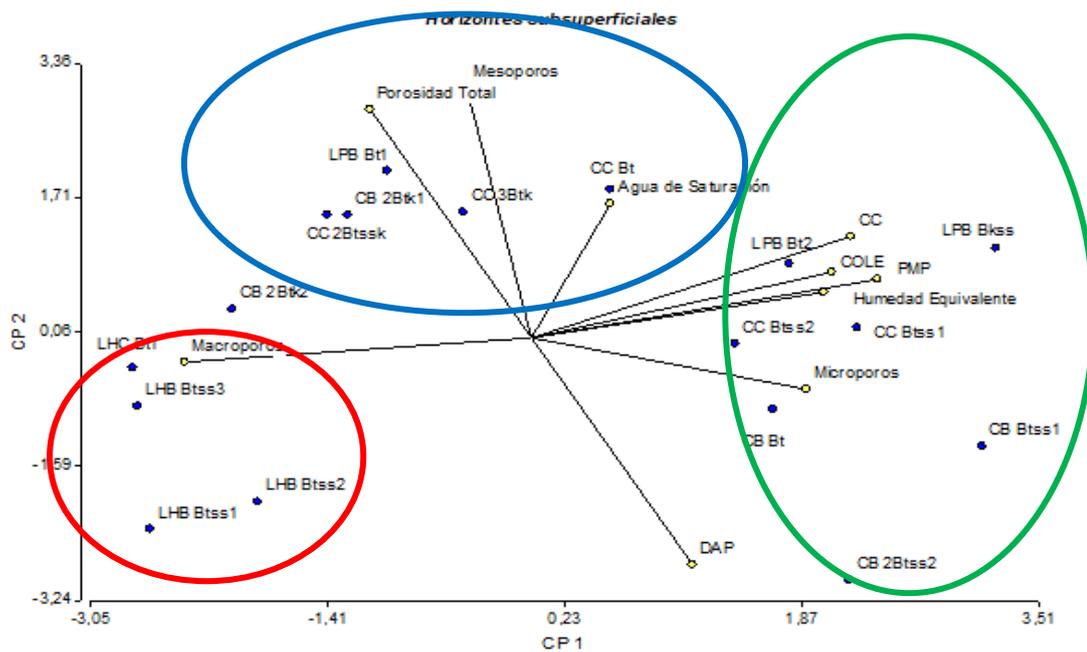


Figura 42- Componentes Principales de los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk y 3Btk de los suelos estudiados.

En la Tabla 17 se representa los coeficientes de correlación de Pearson para las variables estudiadas en los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk y 3Btk. De acuerdo a su análisis surge que las variables más vinculadas entre si son: humedad equivalente y COLE, punto de marchitez permanente y humedad equivalente, COLE y capacidad de campo, porcentaje de microporos y porcentaje de macroporos, punto de marchitez permanente y COLE, capacidad de campo y porcentaje de macroporos, punto de marchitez permanente y porcentaje de macroporos, punto de marchitez permanente y porcentaje de microporos y punto de marchitez permanente y capacidad de campo.

Correlación de Pearson:
coeficientes\probabilidades

	Humedad equivalente	COLE	Porosidad total	Macro	Meso	Micro	CC	PMP	Agua de saturación.
Humedad equivalente	1	0,00025	0,37	0,03	0,75	0,09	0,03	0,01	0,08
COLE	0,78***	1	0,33	0,02	0,95	0,17	0,01	0,01	0,02
Porosidad Total	-0,23	-0,25	1	0,19	0,02	0,56	0,73	0,61	0,99
Macroporos	-0,53**	-0,57**	0,33	1	0,89	0,0023	0,000002	0,0000067	0,8
Mesoporos	-0,08	0,02	0,56**	-0,04	1	0,04	0,36	0,91	0,11
Microporos	0,42	0,35	-0,15	-0,69***	-0,50**	1	0,02	0,00016	0,24
CC	0,54**	0,63***	-0,09	-0,89***	0,24	0,56**	1	0,000063	0,62
PMP	0,63***	0,62***	-0,13	-0,90***	-0,03	0,79***	0,87***	1	0,74
Agua de saturación.	0,43	0,55**	-0,003	-0,07	0,4	-0,3	0,13	0,09	1

Tabla 17 - Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes Bt, Btss, Bkss, 2Btk, 3Btk de los suelos estudiados. (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$).

Estas correlaciones encontradas estarían reflejando la directa interacción entre la intensidad de los procesos de expansión y contracción y la distribución de poros que generan una mayor retención de agua como los microporos. A su vez, se ve claramente la relación entre la presencia de minerales de arcillas de tipo esmectita y la retención de agua mediante el agua de saturación y el COLE.

Teniendo en cuenta los autovalores del análisis de componentes principales, correspondiente a las variables estudiadas de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck, se observó que el eje 1 explica el 63 % de la variabilidad y el eje 2 el 22 %. De esta manera se eligió utilizar estos dos ejes, los cuales explican el 85 % de la variabilidad total. En la Tabla 18 se representan los autovectores del análisis de componentes principales. En el mismo se puede observar que en el eje 1 la variabilidad esta principalmente representada por: CC, COLE, humedad equivalente, PMP, porcentaje de agua de saturación y porcentaje de microporos. En el eje 2, la variabilidad esta principalmente

representada por porosidad total y porcentaje de macroporos. Por lo mencionado, las propiedades que aportan mayor variabilidad para estos horizontes son las relacionadas con la retención hídrica, la porosidad, la distribución de poros y el COLE.

Autovectores				
Variables	e1	e2	CP 1	CP 2
Humedad Equivalente	0,37***	-0,07	0,000051	0,78
COLE	0,39***	-0,12	0,0000019	0,61
Porosidad Total	0,22	0,56***	0,1	0,0029
Macroporos	-0,19	0,56**	0,16	0,003
Mesoporos	0,22	0,0028	0,1	0,99
Microporos	0,35***	-0,19	0,00076	0,43
CC	0,39***	0,07	0,00000026	0,78
PMP	0,36***	0,0041	0,00043	0,99
Agua de Saturación	0,35***	-0,07	0,00069	0,77

Tabla 18- Autovectores de los Componentes Principales de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2Bck y 2Ck de los suelos estudiados. (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$). DAP= densidad aparente.

En la Figura 43 se observan claramente dos grupos de horizontes separados por las distintas variables estudiadas en los mismos. A la izquierda de la Figura 41 se ve un grupo conformado por los horizontes LHB BC₁, LHB BC₂, LHB 2Ck, LHC BC₁ y LHC BC₂ del perfil de Los Hornos y el horizonte CC 2Bck del perfil de Castelar. Este agrupamiento se debió por los mayores valores de porcentaje de macroporos. En cambio, el otro grupo a la derecha en el parte superior de la Figura 43 se encuentran los horizontes LPB Bckss, LPB Ckss, LPC C₁kss y LPC 2Ck los cuales se agruparon a los mayores valores de retención de agua (humedad equivalente, agua de saturación, punto de marchitez permanente y capacidad de campo), COLE y porcentaje de microporos y mesoporos. Esta separación en grupos de estos horizontes más profundos confirma nuevamente lo anteriormente mencionado en el análisis de componentes principales realizado con las determinaciones químicas y físico-químicas para los mismos horizontes

confirmando que la diferencia de los materiales parentales entre los tres perfiles donde en el caso de Castelar y Los Hornos el depósito loésico no permite expresar las propiedades verticas del material esmectito también presente en dichos perfiles.

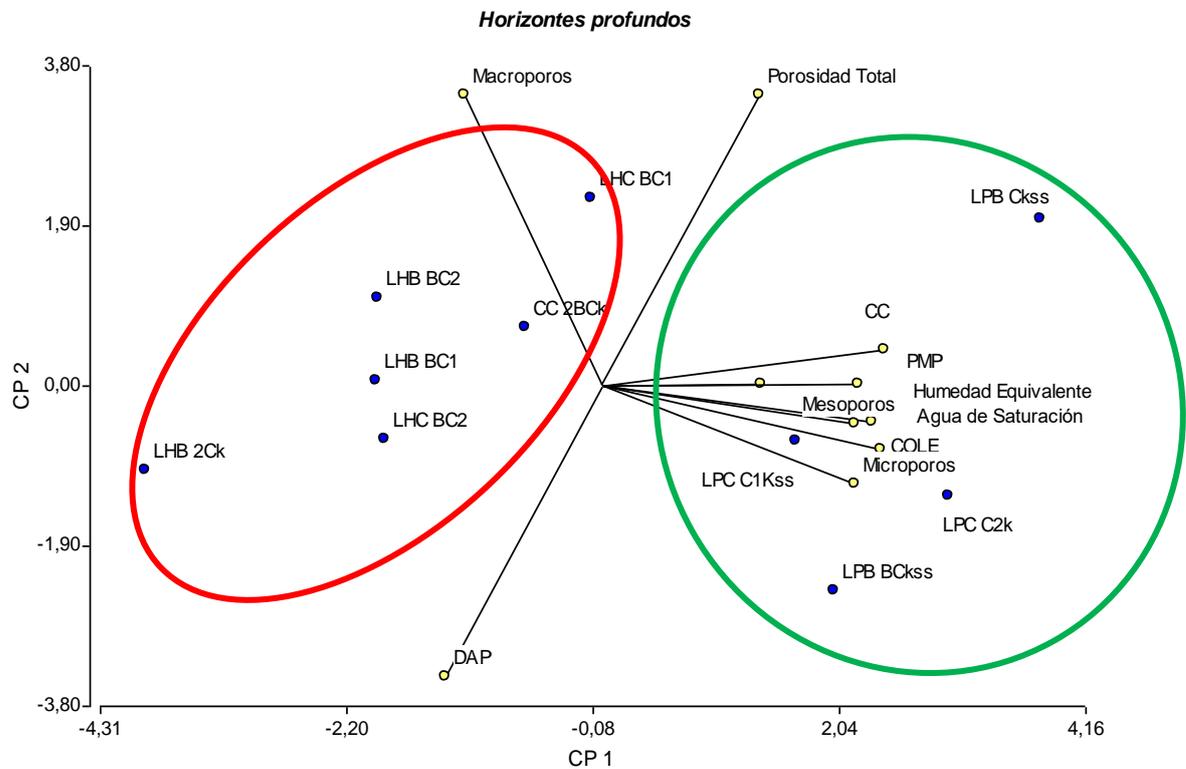


Figura 43- Componentes Principales de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados.

En la Tabla 19 se representa los coeficientes de correlación de Pearson para las variables estudiadas en los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck. De acuerdo a su análisis surge que las variables más vinculadas entre si son: humedad equivalente y COLE, humedad equivalente y porcentaje de mesoporos, humedad equivalente y porcentaje de microporos, humedad equivalente y capacidad de campo, humedad equivalente y punto de marchitez permanente, humedad equivalente y porcentaje de agua de saturación, COLE y porcentaje de microporos, COLE y capacidad de campo, COLE y punto de marchitez permanente, COLE y porcentaje de agua de saturación, capacidad de

campo y porcentaje de microporos, punto de marchitez permanente y porcentaje de microporos, punto de marchitez permanente y capacidad de campo, porcentaje de agua de saturación y porcentaje de microporos, porcentaje de agua de saturación y capacidad de campo y porcentaje de agua de saturación y punto de marchitez permanente.

Correlación de Pearson: coeficientes\probabilidades

	Humedad equivalente	COLE	Porosidad total	Macro	Meso	Micro	CC	PMP	Agua de saturación.
Humedad equivalente	1	0,00007	0,23	0,11	0,08	0,01	0,00023	0,01	0,0017
COLE	0,94***	1	0,27	0,05	0,1	0,00022	0,000038	0,00094	0,0025
Porosidad Total	0,42	0,38	1	0,25	0,3	0,5	0,05	0,17	0,28
Macroporos	-0,53	-0,63**	0,4	1	0,16	0,06	0,25	0,36	0,2
Mesoporos	0,58***	0,55	0,37	-0,48	1	0,5	0,08	0,66	0,36
Microporos	0,77***	0,91***	0,24	-0,60*	0,24	1	0,0034	0,0002	0,0027
CC	0,91***	0,94***	0,63**	-0,4	0,58*	0,82***	1	0,00058	0,0046
PMP	0,79***	0,87***	0,47	-0,33	0,16	0,92***	0,89***	1	0,0043
Agua de saturación	0,85***	0,84***	0,38	-0,45	0,33	0,83***	0,81***	0,81***	1

Tabla 19- Coeficientes de Correlación Pearson entre distintas variables físicas y químicas de los horizontes BC, Ckss, Ck, 2BCk y 2Ck de los suelos estudiados. (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$).

Estas correlaciones encontradas demuestran la relación existente entre la retención de agua y los procesos de expansión y contracción atribuida a la presencia de minerales de arcilla esmectita. Por otro lado, también se evidencia que el efecto de estas propiedades de expansión y contracción pueden estar disminuidas dependiendo del espesor del segundo material sedimentario depositado en los perfiles de Los Hornos y Castelar.

CONCLUSIONES

Los suelos vérticos de la Pampa Mesopotámica y de la Pampa Ondulada en la parte baja de la cuenca del Río Paraná se desarrollaron a partir de sedimentos esmectíticos diferenciados en su origen y composición. Sin embargo, un factor fundamental que habría determinado su evolución y diferenciación en ambos lados del Río Paraná es el espesor del sedimento loésico que los recubrió en el Cuaternario.

El análisis mineralógico del suelo de La Paz indica una gran homogeneidad composicional en el material parental del suelo, tanto en sentido vertical como lateral, lo que se corresponde con los resultados del análisis granulométrico.

A su vez, las diferencias mineralógicas encontradas en el bajo y la cresta del suelo de Los Hornos sugieren la existencia de distintos procesos de pedogénesis (iluviación, neoformación y herencia del material parental) o diferente intensidad de los mismos entre los tres suelos aquí estudiados.

El análisis mineralógico de la fracción arcilla de los suelos Castelar y Los Hornos, en la Pampa Ondulada, pone en evidencia que estos suelos son Vertisoles poligenéticos según lo sugerido en el modelo geodafológico propuesto para dicha región.

Los análisis de susceptibilidad magnética se correlacionan en consecuencia con los datos granulométricos y de la mineralogía de arcillas, indicando que los tres suelos se han desarrollado a partir de materiales parentales diferentes.

A partir de los datos granulométricos, es posible realizar algunas consideraciones respecto a los materiales parentales y los procesos pedogénicos en los tres suelos. Si consideramos al contenido de arena de los suelos como una fracción inmóvil, no susceptible de translocación por procesos de iluviación, y en consecuencia representativa del sedimento que constituye el material parental, podrían inferirse algunas particularidades de cada suelo.

El suelo de La Paz tiene un contenido homogéneo tanto en la cresta como en el bajo lo cual indica la presencia de un mismo material parental. En cambio, en los suelos de Castelar y Los Hornos hay un cambio en el contenido de arena observándose una discontinuidad litológica lo cual indicaría la presencia de dos materiales parentales en dichos suelos.

Los resultados de la capacidad de intercambio catiónico explicada por el contenido de arcilla y materia orgánica indicarían que comportamiento físico-químico de los suelos de Castelar y Los Hornos corresponderían a la familia de los Vertisoles.

Los bajos valores de P extractable en los tres suelos se relacionan con la mineralogía del material parental, constituido por aportes de sedimentos esmectíticos pobres en minerales fosfáticos a diferencia de los loess pampeanos característicos procedentes de fuentes del oeste.

El contenido más reducido de Ki en el suelo de La Paz sería también consistente con la mayor proporción de esmectitas y menor de illitas en su fracción arcilla respecto a los suelos de Castelar y Los Hornos donde se evidenció la presencia de dos materiales parentales.

Los parámetros de retención hídrica analizados muestran diferencias marcadas tanto entre los distintos suelos como entre los perfiles de cresta y bajo de cada suelo.

Estos resultados permiten constatar también a través de estos parámetros físicos una diferenciación entre los materiales parentales de los tres suelos.

Los cambios de porosidad y distribución de poros encontrada en los tres perfiles estarían relacionados con la intensidad de los procesos de expansión y contracción según el contenido y mineralogía de arcilla presente en cada horizonte y sector.

Los resultados obtenidos del coeficiente de extensibilidad lineal ponen en evidencia claras diferencias en la capacidad de expansión entre los suelos aquí estudiados.

La diferencia en el COLE entre ambos perfiles se correlaciona en mayor o menor grado con las diferencias encontradas entre bajo y cresta del suelo con otras variables físicas tales como porcentaje de arcilla, CC y PMP.

Los resultados obtenidos de extensibilidad lineal son un criterio para integrar el subgrupo vértico es cumplido ampliamente por los suelos de Castelar y Los Hornos, los que en los trabajos taxonómico-cartográficos existentes han sido clasificados como Argiudoles vérticos. Dicho relevamiento se habría realizado únicamente sobre el sector cresta de ambos suelos. Esto evidencia la necesidad de hacer muestreos de suelos de mayor dimensión para poder encontrar la estructura diapírica la cual es una morfología característica de los Vertisoles.

Por su parte, los suelos de Castelar y Los Hornos de la Pampa Ondulada clasificados como Vertisoles poseen un mayor espesor de sedimentos loéssicos recientes, permaneciendo los mismos como paleosuelos enterrados, en comparación con los suelos de la Pampa Mesopotámica, donde la erosión de la capa del sedimento loéssico en las laderas negras de los perfiles provocó la exhumación de vertisoles.

Con respecto al suelo de La Paz ubicado en la Pampa Mesopotámica se observó que tiene diferencias en varios parámetros físicos y químicos de los Vertisoles anteriormente descritos en la misma zona. Sería necesario realizar nuevos estudios para determinar el origen de este tipo de suelos.

El análisis estadístico de componentes principales logró evidenciar la diferencia de los materiales parentales encontrados en los tres suelos estudiados, la relación existente entre la mineralogía de arcillas y diversas propiedades físicas y físico-químicas como así también con las propiedades hidrofísicas.

El modelo geoedafológico propuesto para explicar las diferencias encontradas en los suelos de la Pampa Ondulada necesitaría ser replicado mediante numerosos muestreos

de suelos que incluyan esta metodología de análisis, como también la necesidad de probar parámetros que sirvan para llegar indirectamente a los mismos resultados utilizados de manera tradicional.

Es necesario, para tener poder tener un uso adecuado de los suelos de la Región Pampeana, siendo esta una de las regiones agrícolas más productivas de la Argentina, poder contar con una cartografía adecuada y actualizada que sirva para comprender las características y el funcionamiento de los suelos siendo estos modelos una herramienta muy útil y práctica para la confección de estos nuevos mapas.

CONCLUSIONS

The vertic soils of the Mesopotamian Pampas and the undulating Pampas in the lower part of the Parana River basin were developed from smectitic sediments differentiated in their origin and composition. However, a fundamental factor that would have determined their evolution and differentiation on both sides of the Paraná River is the thickness of the loessic sediment that covered them in the Quaternary.

The mineralogical analysis of the soil from La Paz indicates a great compositional homogeneity in the parent material of the soil, both vertically and laterally, which corresponds to the results of the granulometric analysis.

In turn, the mineralogical differences found in the lower and crestal soils of Los Hornos suggest the existence of different pedogenesis processes (illuviation, neoformation, and inheritance of parental material) or different intensity of the same processes among the three soils studied here.

The mineralogical analysis of the clay fraction of the Castelar and Los Hornos soils of the Pampa Ondulada shows that these soils are polygenetic vertisols as suggested in the geopedaphological model proposed for said region.

Magnetic susceptibility analyzes correlate accordingly with granulometric and clay mineralogy data, indicating that the three soils have developed from different parent materials.

From these granulometric data, it is possible to make some considerations regarding parent materials and pedogenic processes in the three soils. If we consider the sand content of soils as an immobile fraction, not susceptible to translocation by illuviation processes, and consequently representative of the sediment that constitutes the parent material, some particularities of each soil could be inferred.

The soil of La Paz has a homogeneous content both on the crest and on the bottom, which indicates the presence of the same parent material. On the other hand, in the soils of Castelar and Los Hornos there is a change in the sand content, observing a lithological discontinuity, which would indicate the presence of two parent materials in said soils.

The results of the cation exchange capacity explained by the clay and organic matter content would indicate that the physical-chemical behavior of the Castelar and Los Hornos soils would correspond to the vertisols family.

The low values of total and soluble P in the three soils are related to the mineralogy of the parent material, made up of contributions of smectitic sediments poor in phosphatic minerals, unlike the characteristic Pampas loess from western sources.

The lower Ki content in the La Paz soil would also be consistent with the higher proportion of smectites and lower illites in its clay fraction compared to the Castelar and Los Hornos soils where the presence of two parent materials was evidenced.

The water retention parameters analyzed show marked differences both between the different soils and between the crest and low profiles of each soil.

These results also allow us to verify through these physical parameters a differentiation between the parent materials of the three soils.

The changes in porosity and pore distribution found in the three profiles would be related to the intensity of the expansion and contraction processes according to the content and mineralogy of clay present in each horizon and sector.

The results obtained from the coefficient of linear extensibility show clear differences in the expansion capacity between the soils studied here. The difference in the COLE between both profiles correlates to a greater or lesser degree with the differences found between the bottom and the top of the soil with other physical variables such as % clay, CC and PMP.

The results obtained of linear extensibility are a criterion to integrate the vertic subgroup, it is widely fulfilled by the soils of Castelar and Los Hornos, which in the existing taxonomic-cartographic works have been classified as vertic argiudols. Said survey would have been carried out only on the crest sector of both soils. This evidences the need to carry out larger soil samples in order to find the diapiric structure, which is a characteristic morphology of vertisols.

For their part, the Castelar and Los Hornos soils of the Undulating Pampa classified as vertisols differ from the vertisols of the Mesopotamian Pampa due to the greater thickness of recent loessic sediments, remaining the same as buried paleosols.

This differs from what was observed in the Mesopotamian Pampas, where the erosion of the loessic sediment layer on the black slopes of the profiles caused the exhumation of vertisols.

Regarding the soil of La Paz located in the Mesopotamian Pampa, it was observed that it has differences in several physical and chemical parameters of the vertisols previously described in the same area. Therefore, it would be necessary to carry out new studies to determine the origin of this type of soil.

The statistical analysis of principal components was able to demonstrate the difference in parent materials found in the three soils studied, the relationship between clay mineralogy and various physical and physical-chemical properties as well as hydrophysical properties.

The geodaphogenic model proposed to explain the differences found in the soils of the Rolling Pampa would need to be replicated by using numerous soil samples that include this analysis methodology. As well as the need to test parameters that serve to indirectly reach the same results used in a traditional way.

In order to have adequate use of the soils of the Pampean Region, this being one of the most productive agricultural regions in Argentina, it is necessary to have adequate and updated cartography that serves to understand the characteristics and functioning of the soils. These models being a very useful and practical tool for the preparation of these new maps

BIBLIOGRAFIA

- Ahmad N. 1983. Vertisols. In: Wilding L, Smeck N, Hall G (eds). Pedogenesis and soil taxonomy. Elsevier, New York, pp 91-123.
- Altinier MV, Morras H, Bressan E & Castiglioni. 2010. Mineralogía de Arcillas y su Susceptibilidad Magnética de tres Argiudoles del sur de la Pampa Ondulada. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Rosario, Argentina.
- Bear J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. Elsevier, N.Y.
- Bedendo D. 2019. Soils of Entre Ríos. In: Rubio G, Lavado R & Pereyra F (eds). The Soils of Argentina, World soils books series, Springer International Publishing, pp 165-173.
- Blake G & Hartge K. 1986b. In: Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. SSSA, Madison, Wisconsin, second edition. 1188 pp.
- Blokhuis W. 1982. Morphology and genesis of Vertisols. In: Vertisols and Rice Soils in the Tropics. Transactions 12th International Congress of Soil Science, New Delhi, Vol. 3, pp 23-47.
- Bray RH & Kurtz LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. Soil Sci. 59: 39-45.
- Bressan EM, Castiglioni M, Altinier V & Morras H. 2012. Efecto del Contenido y Tipo de Arcilla en distintas Propiedades Físicas de suelos de la Pampa Ondulada. Actas XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.
- Bressan EM 2013. Interacciones entre propiedades físicas y composición mineralógica y granulométrica de suelos Argiudoles de la Pampa Ondulada. Tesis de Maestría. Escuela

para Graduados Alberto Soriano Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.

-Bressan EM, Castiglioni MG & Morrás, H 2014. Análisis de algunos criterios para la caracterización de Argiudoles vérticos de la Pampa Ondulada. Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Argentina.

-Briggs LJ & Mc Lane JW. 1907. USDA Soils Bull. N° 45.

-Brindley GW & Brown G. 1980. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society: 507 p.

-Buol F, Hole D & Mc Cracken R. 1980. Soil Genesis and Classification. 2a. ed. Iowa State University Press. Ames. 406 pp.

-Camilion M. 1993. Clay mineral composition of Pampean loess (Argentina). Quaternary International, vol. 17: 27-31.

-Coulombe CE, Wilding LP & Dixon JB. 1996. Overview of Vertisols: Characteristics and impacts on society. Adv. Agron. 57: 289-375.

-Cumba A, Imbellone P & Ligier D. 2005. Propiedades morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas de suelos del sur de Corrientes. Revista de la Asociación Geológica Argentina 60, 579-590.

-Danielson R & Sutherland P. 1986. Porosity. In: Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. SSSA, Madison, Wisconsin, second edition. 1188 p.

-Darwich N. 1983. Niveles de fósforo asimilable en los suelos pampeanos. IDIA n (409-412), 1-5.

-Dudal R. 1965. Dark clay soils of tropical and subtropical regions. In: FAO Agricultural Development. Paper No. 83 (FAO, Rome, 1965).

- Dudal R & Eswaran H. 1998. Distribution, properties and classification of Vertisols. In: Wilding L, Puentes R (eds) Vertisols: their distribution, properties, classification and management. Technical Monograph n 18, Texas A & University Printing Center, pp 1-22.
- Duran A, Morrás H, Studdert G & Xiaobing.L. 2011. Distribution, Properties, Land Use and Management of Mollisols in South America. Chin. Geogr. Sci. 21 (3).
- Ehlers W, Wendroth O & F de Mol. 1995. Characterizing pore organization by soil physical parameters. In: Hartge, KH; Stewart BA (Eds.), Soil Structure-Its Development and Function. Adv. Soil Sci. 257-275.
- FAO. 2022. Global status of black soils. Rome. <https://doi.org/10.4060/cc3124en>
- Fidalgo F, De Francesco FO & Pascual R. 1975. Geología superficial de la llanura bonaerense. Relatorio VI Congreso Geológico Argentino 103-138.
- Gee GW & Bauder JW. 1986. Particle-size Analysis; In: Methods of Soil Analysis, Part 1°, Physical and Mineralogical Methods (Klute and Arnold ed.) pp. 2nd ed. Amer. Soc. Agr.,Soil Sci.Soc. Amer. Madison, Wisconsin, USA.
- Gómez L. 1993. Carta básica semidetallada de suelos. Complejo de Investigaciones Castelar. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Provincia de Buenos Aires. INTA-CIRN, Instituto de Suelos, 114 p. y mapas.
- González Bonorino F. 1965. Mineralogía de las fracciones arcilla y limo del Pampeano en el área de la Ciudad de Buenos Aires y su significado estratigráfico y sedimentológico. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 20(1): 67-148.
- González Bonorino, F. 1966. Soil clay mineralogy of the Pampa plains, Argentina. J. of Sed. Petrology, 36(4):1026-1035.

- Greenland DJ. 1977. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent?. *Phil Trans. Royal Soc. London* 281:193-208.
- Grossman R, Brasher B, Franzmeier D & Walker J. 1968. Linear extensibility as calculated from natural-clod bulk density measurements. *SSSA. Proceedings*, 32:570-573.
- Hartley P, Presley D, Ransom M, Hettiarachchi G & West L. 2014. Vertisols and vertic properties of soils of the Cherokee Prairies of Kansas. *Soil Sci Am J* 78: 556-566.
- Holmgren GGS. 1968. Nomographic calculation of linear extensibility in soils containing coarse fragments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, vol. 32: 568-570.
- Hurtado M, Gimenez JE & Cabral MG. 2006. Análisis ambiental del partido de La Plata. Aportes al ordenamiento territorial. Consejo Federal de Inversiones. Instituto de Geomorfología y Suelos. La Plata. 134 pp.
- Imbellone P & Teruggi M. 1993. Paleosols in loess deposits of the Argentine Pampa. *Quaternary International*, 17: 49-56.
- Imbellone P; Gimenez J & Panigatti J. 2010. Suelos de la Región Pampeana. In: *Procesos de Formación*. Ediciones INTA, Buenos Aires, pp 288.
- InfoStat 2002. InfoStat versión 2002. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- INTA, 1990. Plan Mapa de Suelos, Convenio INTA Gobierno de Entre Ríos. Carta de Suelos de la República Argentina, Departamento La Paz, Provincia de Entre Ríos. Tomos I y II. E.E.A. Paraná Inta. Serie relevamiento de Recursos Naturales n° 7 (ISSN 03259099), 321 pp.
- INTA-SAGyP, 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina, Buenos Aires.

- INTA, 1998. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento de Paraná. Entre Ríos. Escala 1:100.000. Estación Experimental Agropecuaria Paraná. Serie Relevamiento de Recursos Naturales 17.
- Iñiguez A & Scoppa C. 1970. Los minerales de arcilla en los suelos zonales ubicados entre los ríos Paraná y Salado (Prov. De Buenos Aires). RIA, serie 3, vol. VII (1): 1-41.
- Iriondo M. 1990. Map of the South Americans plains – Its present state. Quat. S. Am. A. 7: 197-218
- Iriondo M. 1994. Los climas cuaternarios de la Región Pampeana. In: Com. Mus. Prov. Cs. Nat. Florentino Ameghino, Santa Fé, vol. 4, N° 2, p. 48.
- Iriondo M & Kröhling D. 1996. Los sedimentos eólicos del noroeste de la llanura pampeana. Actas XIII Congr.Geológico Argentino. Tomo IV: 27-48.
- Jongorius A & Bonfils C. 1964. Micromorfología de un suelo negro grumosólico de la provincia de Entre Ríos. Revista de Investigaciones Agropecuarias, Serie 3, Clima y Suelo I(2):33-53.
- Klute A & Dirksen C. 1986. In: Klute, A., 1986. Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods. SSSA, Madison, Wisconsin, second edition. 1188 pp.
- Liu Q, Torrent J, Morrás H, Hong A, Jiang Z & Y Su. 2010. Superparamagnetism of two modern soils from the northeastern Pampean region, Argentina and its paleoclimatic indications. Geophys. J. Int. 183, 695-705.
- Martel YA, De Kimpe CR & Laverdiere MR. 1978. Cation exchange capacity of clay-rich soils in relation to organic matter, mineral composition, and surface area. Soil Science Society of America Journal 42: 764-767.

- Morrás H, Postma J, Rapp M & Scoppa C. 1980. Mineralogía de arcillas de algunos suelos del norte de la provincia de Santa Fe. Actas IX Reunion Arg. Ciencia del Suelo, Paraná, 1980, Vol. III, pp.1185-1191.
- Morrás H, Robert D & Bocquier G. 1982. Caracterisation minéralogique de certains sols salsodiques et planosoliques du "Chaco Deprimido". Cah. ORSTOM, Sér Pédol., XIX (2): 151-169.
- Morrás H, Bayarski A, Benayas J & Vesco C. 1993. Algunas características genéticas y litológicas de una toposecuencia de suelos vérticos de la provincia de Entre Ríos (Argentina). In: Gallardo J (ed) El estudio del suelo y de su degradación. Actas del XII Congr. Latinoam. de la Cien. del Suelo. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, vol II, Salamanca, pp. 1054-1061.
- Morrás H. 1995. Mineralogy and cation exchange capacity of the fine silt fraction in two soils from southern Chaco Region (Argentina). *Geoderma* 64: 281-295.
- Morrás H. 1996. Composición y evolución de la fracción limo grueso de suelos del Chaco Meridional argentino. Actas XIII Congr. Geológico Argentino, Buenos Aires, Vol. IV: 263.
- Morrás H. 1997. Origen y mineralogía del material parental de los suelos de la región pampeana. Homogeneidad o heterogeneidad? 1° Taller de Sedimentología y Medio Ambiente. Asociación Argentina de Sedimentología, Buenos Aires, pp.19-20.
- Morrás H, Nabel P & Zech W. 1998. Identificación de distintos materiales parentales de suelos Argiudoles en un sector de la Pampa Ondulada (Pcia. de Buenos Aires). Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, pp. 305-306.
- Morrás, H; W Zech & P Nabel. 1998. Composición geoquímica de suelos y sedimentos loésicos de un sector de la Pampa Ondulada. Actas, Quintas jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses, Vol. I., Mar del Plata, pp. 225-232.

- Morrás H. 1999. Geochemical differentiation of Quaternary sediments from the Pampean region based on soil phosphorous contents as detected in the early 20th century. *Quaternary International*, 62: 57-67.
- Morrás H. 1999. Composición geoquímica de suelos y sedimentos cuaternarios de un sector del Chaco Meridional. Actas del 1° Congreso Argentino del Cuaternario y Geomorfología, Santa Rosa, La Pampa, p. 13.
- Morrás H & Cruzate G. 2000-a. Clasificación textural y distribución espacial del material originario de los suelos de la Pampa Norte. Actas XVII Congr. Arg. de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, (editado en CD).
- Morrás, H & Cruzate G. 2000-b. Distribución de los sedimentos superficiales en la Región Pampeana Norte (Argentina) a través del análisis de la variación espacial de parámetros físicos y químicos. Actas II Cong. Latinoam. de Sedimentología, Mar del Plata, pp.126-127.
- Morrás H & Cruzate G. 2002. "Origen y distribución del potasio en suelos y sedimentos superficiales de la región Chaco-pampeana". En: El potasio en sistemas agrícolas argentinos (Eds.: Melgar, Magen y Lavado), INTA-IPI, pp.35-42.
- Morrás H, Altinier MV, Castiglioni M, Grasticini G, Ciari G & Cruzate G. 2002. "Composición mineralógica y heterogeneidad espacial de sedimentos loésicos superficiales en la Pampa Ondulada". XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Pto. Madryn, (editado en CD).
- Morrás H. 2003. Distribución y origen de sedimentos superficiales de la Pampa Norte en base a la mineralogía de arenas. Resultados preliminares. Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología, 10 (1): 53-64.
- Morrás H & Moretti L. 2016. A new soil-landscape approach to the génesis and distribution of Typic and Vertic Argiudolls in the rolling Pampa of Argentina. In: Zinck

A, Metternich G, Bocco G, del Valle H (eds) Geopedology: an integration of geomorphology and Pedology for soil and landscape studies. Springer, Heidelberg, pp 193-209.

-Morrás H. 2018. Material parental y pedogénesis de suelos vérticos del Departamento de La Paz, Entre Ríos. Actas XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo., S.M. de Tucumán, Comisión 5, pp 43-48.

-Morrás H. 2020. El material parental de los suelos de la Región Pampeana en base a la mineralogía de arenas. Aplicaciones a la interpretación de procesos pedológicos. In: Imbellone P & Barbosa O (eds). Suelos y Vulcanismo. Asociaciones Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Capítulo 6, pp. 168-1184

-Morrás H, Tenti L, Schulz G, Rodríguez D, Bressan EM, Carfagno P & Iriogin J. 2022. Guía de Reconocimiento de Suelos Gira edafológica por el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CNIA-INTA). XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina.

-Morrás H, Bressan EM, Angelini M, Tenti V, Moretti L, Rodríguez D & Schulz G. 2023. Polygenetic Vertisols and “Hidden” Vertisols of the Parana River Basin, Argentina. Geopedology An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies. Second Edition. Chapter 17, 337-365

-Murthy R, Bhattacharjee J, Landey R & Pofali R. 1982. Distribution, characteristics and classification of Vertisols. In: Vertisols and Rice Soils in the Tropics. Symposia Paper In, 12th International Congress of Soil Science, Vol. 3, Indian Society of Soil Science, New Delhi, pp 3-22.

-Quintero CE, Riso L, González A & Izaguirre M 2000. Estado de fertilidad de los suelos de Entre Ríos. Principales limitaciones. Revista Facultad de Agronomía. UBA. 20 (1):15-19.

- Read JW & Ridgell RH. 1921. On the use of the conventional carbon factor in estimating soil organic matter. *Soil Science*, Vol. 13 N°1 1:6.
- Reitemeier RF & Fireman M. 1944. Prevention of calcium carbonate precipitation in soil solutions and waters by sodium hexametaphosphate. *Soil. Sci.* 58: 35-41, illus.
- Richards LA. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science* 66(2):105-110.
- Richards LA. 1949a. Filter funnels for soils extracts. *Agro. Jour.* 41:446, Illus.
- Robert M. 1975. Principes de détermination qualitative des minéraux argileux á l`aide des rayons X. *Annales Agronomiques*, vol. 26, n° 4 : 363-399.
- Rodríguez D, Schulz GA, Aleksa A & Vuegen LT. (2019). Distribution and Classification of Soils. In: Rubio G., Lavado R., Pereyra F. (eds) *The Soils of Argentina*. World Soils Book Series. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-76853-3_5. ISBN: 978-3-319-76851-9. pp. 63-79.
- Sagayo JM, Collantes M, Karlson A & Sanabria J. 2001. Genesis and distribution of the Late Pleistocene and Holocene loess of Argentina: a regional approximation. *Quat. Int.* 76/77: 247-257.
- Schaetzl R & Thompson S. 2015. Soil. In: *Genesis and Geomorphology*. 2nd edition. Cambridge University Press, New York, p 778.
- Schoeneberger PJ, Wysocki DA, Benhman EC & Broderson WD. 2002. Field book for describing and sampling. Version 2.0. USDA-NRCS, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Scoppa C. 1974. The pedogenesis of a sequence of Mollisols in the Undulating Pampa (Argentina). Dr. Thesis, State University of Ghent, Bélgica. 158 p. y anexos.

- Scoppa C. 1976. La mineralogía de los suelos de la llanura pampeana en la interpretación de su génesis y distribución. Actas VII Reun. Arg. De la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, IDIA, Suplemento 33, pp.659-673.
- Stephan S, De Petre A, De Orellana J & Priano L. 1977. Brunizem soils of the central part of *Pédologie*, XXVII (3): 225-253.
- Tasi HA. 2009. Aplicación de las Cartas de Suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar Índices de Productividad Específicos para los principales Cultivos Agrícolas. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. 618 pp.
- Teruggi M. 1957. The nature and origin of Argentine loess. *J. of Sed. Petrology*, 27(3): 322-332.
- Thomas PJ, Baker JC & Zelazny LW. 2000. An expansive soil index for predicting shrink-swell potential. *Soil Sci. Soc. Am J.* 64 :268-274.
- USDA. 1996. Coefficient of linear extensibility (COLE). Soil survey laboratory methods manual. Soil survey investigation report nº 42. Version 3.0. National Soil Survey Center. pp 177-178.
- Van Stiphout, TPJ; HAJ Van Lanen; OH Boldersma & J Bouma. 1987. The effect of bypass flow and internal catchment of rain on the water regime in a clay loam grassland soil. *Journal of Hydrology* 95 1-11.
- USDA 2010. Keys to Soil Taxonomy. Eleven edition. Soil Survey Division. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- van Wambeke A & Scoppa CO. 1976. Las tasas climáticas de los suelos argentinos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias, Serie 3 Clima y Suelo*, Vol. XIII, Nº 1.
- Walkley A & Black A. 1934. An examination of Degtareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:38-39.

- Wilding LP. 1985. Genesis of Vertisols. En: Proceedings of the 5th International Soil Classification Workshop. Sudan. 47-62.
- Wilding LP & Puentes R. 1988. Vertisols: Their distribution, properties, classification and management. Technical Monograph 18, Texas A&M University Printing Center, College Station, TX. 193 pp.
- Wilding LP & Tessier D. 1988. Genesis of Vertisols: shrink-swell phenomena. En. Vertisols: Their distribution, properties, classification and management. Wilding LP & Puentes R (Eds). Texas A&M University Printing Center. College Station, TX. 55-81
- Wilding LP, Williams D, Millar W, Cook T & Eswaran H. 1990. Close interval spatial variability: A case o study in Texas. En: Proceedings of the Sixth International Soil Correlations Meeting (VIISCOM): Characterization, Classification, and Utilization of Cold Aridisols and Vertisols. Kimble, JM: (Ed). USDA, Lincoln, NE. 232-247.
- Wilding LP, Kovda IV, Morgum EG & Williams D. 2002. Reappraisal of the pedon concept for Vertisols: consociations or complexes?. 17th World Congress of Soil Science. Paper 872: 1-12, Bangkok.
- Williams D, Cook T & Lynn W. 1996. Evaluating the field morphology of Vertisols. Soil Surv. Horiz. 37: 123-131.
- Wiliams J, Prebble RE, Wiliams WT & Hignett CT. 1983. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic.
- Zárate M & Blasi A. 1993. Late Pleistocene-Holocene eolian deposits of the southern Buenos Aires Province., Argentina: a preliminary model. Quaternary International 17: 15-20.
- Zárate M. 2003. Loess of southern South America. Quaternary Science Reviews 22: 1987-2006.

-Zarate M. 2005. El Cenozoico Tardío continental de la Provincia de Buenos Aires. In: de Barrio R, Etcheverry M, Caballé M & Llambías E (eds). Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Cap. IX, pp 139-158

APENDICE

Análisis granulométricos

Bajo del Perfil de La Paz				
Horizonte	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena
A1	0 a 12 cm	47,5	44,2	8,1
Bt1	12 a 36 cm	54	40,9	4,3
Bt2	36 a 71 cm	48,7	43,2	7,3
Bkss	71 a 88 cm	52	38,3	5,5
BCkss	88 a 109 cm	55,3	32,4	5,3
Ckss	109 cm a piso	52,4	36,4	3,6

Cresta del Perfi de La Paz				
Horizonte	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena
A1	0 a 12 cm	49,1	42,1	5,3
AC1kss	12 a 42 cm	47	39,5	4,3
AC2Kss	42 a 73 cm	53,1	35,5	3,6
C1Kss	73 a 91 cm	51,9	36,1	4
C2k	91 cm a +	49	39,8	4,3

Bajo del Perfil de Castelar				
Horizonte	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena
Ap	0 a 15 cm	33,1	52,2	14,3
A	15 a 22 cm	36,9	49,5	13,9
Bt	22 a 57 cm	39,5	47,2	13,1
Btss1	57 a 80 cm	48,8	37	14,3
2Btss2	80 a 120 cm	42,6	42,2	14,7
2Btk1	120 a 150 cm	35,8	42,1	21,4
2Btk2	150 a 248 cm	33,5	41,1	20,1

Cresta del Perfil de Castelar				
Horizonte	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena
Ap	0 a 18 cm	28,6	56,4	15,1
A	18 a 26 cm	38,4	49,5	12,5
Bt	26 a 57 cm	43,2	39,5	16,7
Btss1	57 a 82 cm	48,3	34,8	16,3
Btss2	82 a 106 cm	36,7	41,2	21,4
2Btssk	106 a 170 cm	34,5	40,1	17,1
2Bck	170 a 190 cm	32,5	41,2	19,6
3Btk	190 a 280 cm	34,5	44,2	15,9

Bajo del Perfil de Los Hornos				
Horizonte	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena
A1	0 a 19 cm	34,3	51,8	13,7
A2	19 a 30 cm	32,9	50,8	16
BA	30 a 46 cm	40,5	46,2	13
Btss1	46 a 70 cm	46,8	41,2	12,1
Btss2	70 a 90 cm	47	40,1	12,7
Btss3	90 a 102 cm	45,6	41,8	13
BC1	102 a 120 cm	43,5	42,3	14,6
BC2	120 a 138 cm	39,3	46,2	14,5
2Ck	138 cm a +	26,5	53,2	17,7

Cresta del Perfil de Los Hornos				
Horizonte	Profundidad	Arcilla	Limo	Arena
A1	0 a 18 cm	34,5	52,1	13,1
A2	18 a 28 cm	33,2	51,9	15,1
BA	28 a 60 cm	38,4	49,1	12,6
Bt1	60 a 90 cm	40,2	48,6	11,1
BC1	90 a 120 cm	36,5	50,5	13
BC2	120 cm a +	32,5	52,8	14,7

Análisis de Susceptibilidad Magnética

Bajo del Perfil de La Paz		
Horizonte	Profundidad	SM
A1	0 a 12 cm	0,250
Bt1	12 a 36 cm	0,301
Bt2	36 a 71 cm	0,236
Bkss	71 a 88 cm	0,276
BCkss	88 a 109 cm	0,250
Ckss	109 cm a piso	0,293

Cresta del Perfi de La Paz		
Horizonte	Profundidad	SM
A1	0 a 12 cm	0,280
AC1kss	12 a 42 cm	0,288
AC2Kss	42 a 73 cm	0,273
C1Kss	73 a 91 cm	0,295
C2k	91 cm a +	0,303

Bajo del Perfil de Castelar		
Horizonte	Profundidad	SM
Ap	0 a 15 cm	0,899
A	15 a 22 cm	0,759
Bt	22 a 57 cm	0,406
Btss1	57 a 80 cm	0,772
2Btss2	80 a 120 cm	1,349
2Btk1	120 a 150 cm	1,494
2Btk2	150 a 248 cm	1,130

Cresta del Perfil de Castelar		
Horizonte	Profundidad	SM
Ap	0 a 18 cm	0,881
A	18 a 26 cm	0,820
Bt	26 a 57 cm	0,462
Btss1	57 a 82 cm	1,221
Btss2	82 a 106 cm	1,367
2Btssk	106 a 170 cm	0,955
2BCk	170 a 190 cm	0,516
3Btk	190 a 280 cm	0,162

Bajo del Perfil de Los Hornos		
Horizonte	Profundidad	SM
A1	0 a 19 cm	1,311
A2	19 a 30 cm	1,120
BA	30 a 46 cm	1,348
Btss1	46 a 70 cm	1,404
Btss2	70 a 90 cm	1,592
Btss3	90 a 102 cm	1,567
BC1	102 a 120 cm	1,874
BC2	120 a 138 cm	1,634
2Ck	138 cm a +	1,619

Cresta del Perfil de Los Hornos		
Horizonte	Profundidad	SM
A1	0 a 18 cm	1,245
A2	18 a 28 cm	0,863
BA	28 a 60 cm	1,539
Bt1	60 a 90 cm	1,495
BC1	90 a 120 cm	1,784
BC2	120 cm a +	1,831

Análisis químicos y físico-químicos

Bajo del Perfil de La Paz						
Horizonte	Profundidad	CIC	pH	CO	K	P
A1	0 a 12 cm	32,1	6,31	2,50	1,0	4,2
Bt1	12 a 36 cm	35,0	6,75	0,63	0,9	6,7
Bt2	36 a 71 cm	33,6	7,22	0,43	0,4	5,8
Bkss	71 a 88 cm	34,7	7,91	0,39	0,4	7,0
BCkss	88 a 109 cm	37	8,19	0,17	0,5	5,6
Ckss	109 cm a piso	34,7	8,13	0,10	0,8	8,4

Cresta del Perfil de La Paz						
Horizonte	Profundidad	CIC	pH	CO	K	P
A1	0 a 12 cm	33	7,43	1,38	1,1	8,4
AC1kss	12 a 42 cm	31,3	7,94	0,43	1,0	6,1
AC2Kss	42 a 73 cm	37	8,04	0,33	0,9	7,3
C1Kss	73 a 91 cm	32	8,11	0,25	0,9	5,6
C2k	91 cm a +	32	8,08	0,21	1,0	8,7

Bajo del Perfil de Castelar						
Horizonte	Profundidad	CIC	pH	CO	K	Fósforo
Ap	0 a 15 cm	28,2	5,84	1,56	1,27	3,8
A	15 a 22 cm	30,6	5,9	1,27	1,70	1,6
Bt	22 a 57 cm	30,5	6,86	0,76	1,30	4
Btss1	57 a 80 cm	41,5	7,13	0,29	1,60	3,7
2Btss2	80 a 120 cm	33,2	7,42	0,16	2,80	12,7
2Btk1	120 a 150 cm	30,9	8,13	0,12	1,90	5,6
2Btk2	150 a 248 cm	29,2	7,89	0,11	1,90	8,1

Cresta del Perfil de Castelar						
Horizonte	Profundidad	CIC	pH	CO	K	Fósforo
Ap	0 a 18 cm	24,1	6,13	1,67	1,90	4,6
A	18 a 26 cm	31,1	6,35	1,08	1,20	1,3
Bt	26 a 57 cm	33,6	7,29	1,43	1,10	5,9
Btss1	57 a 82 cm	37	7,74	0,64	1,30	6,8
Btss2	82 a 106 cm	30,3	8,37	0,42	1,60	4,9
2Btssk	106 a 170 cm	26,9	8,77	0,26	1,40	11,2
2Bck	170 a 190 cm	26,6	8,77	0,19	1,40	12,4
3Btk	190 a 280 cm	28	8,67	0,12	1,70	7,7

Bajo del Perfil de Los Hornos						
Horizonte	Profundidad	CIC	pH	CO	K	P
A1	0 a 19 cm	31,2	6,28	2,23	1,7	2,6
A2	19 a 30 cm	28,9	6,38	1,63	1,7	2,0
BA	30 a 46 cm	32,5	6,45	0,93	2,1	2,7
Btss1	46 a 70 cm	34,8	6,29	0,71	1,8	22,6
Btss2	70 a 90 cm	41,5	5,82	0,58	1,6	41,6
Btss3	90 a 102 cm	40,2	5,95	0,44	1,7	50,2
BC1	102 a 120 cm	35,1	6,07	0,28	1,9	46,8
BC2	120 a 138 cm	30,1	6,36	0,21	1,9	36,0
2Ck	138 cm a +	28,5	7,9	0,12	2,0	12,2

Cresta del Perfil de Los Hornos						
Horizonte	Profundidad	CIC	pH	CO	K	P
A1	0 a 18 cm	28,6	6,13	2,48	1,9	2,8
A2	18 a 28 cm	28,5	6,44	2,09	1,7	2,6
BA	28 a 60 cm	31,2	6,20	1,65	1,3	1,7
Bt1	60 a 90 cm	33,5	6,24	0,72	1,4	1,1
BC1	90 a 120 cm	30,6	6,60	0,17	1,4	1,9
BC2	120 cm a +	27,5	6,58	0,05	1,3	2,1

Análisis de Retención de Agua

Bajo del Perfil de La Paz				
Horizonte	Profundidad	Humedad Equivalente	CC	PMP
A1	0 a 12 cm	41,19	32,41	13,39
Bt1	12 a 36 cm	45,14	37,73	28,66
Bt2	36 a 71 cm	46,42	42,86	31,57
Bkss	71 a 88 cm	49,78	42,45	35,59
BCkss	88 a 109 cm	54,62	40,18	34,17
Ckss	109 cm a piso	67,97	45,01	32,33

Cresta del Perfi de La Paz				
Horizonte	Profundidad	Humedad Equivalente	CC	PMP
A1	0 a 12 cm	42,34	41,66	29,50
AC1kss	12 a 42 cm	46,05	38,04	28,34
AC2Kss	42 a 73 cm	42,52	40,04	29,97
C1Kss	73 a 91 cm	46,96	39,61	29,29
C2k	91 cm a +	59,37	41,23	29,70

Bajo del Perfil de Castelar				
Horizonte	Profundidad	Humedad Equivalente	CC	PMP
Ap	0 a 15 cm	22,29	36,12	31,05
A	15 a 22 cm	28,73	22,12	17,20
Bt	22 a 57 cm	46,16	42,50	32,04
Btss1	57 a 80 cm	49,15	43,13	33,40
2Btss2	80 a 120 cm	39,74	43,30	31,47
2Btk1	120 a 150 cm	35,92	41,16	30,79
2Btk2	150 a 248 cm	35,9	36,93	27,18

Cresta del Perfil de Castelar				
Horizonte	Profundidad	Humedad Equivalente	CC	PMP
Ap	0 a 18 cm	22,2	32,42	28,36
A	18 a 26 cm	26,2	26,57	20,52
Bt	26 a 57 cm	44,72	42,56	31,90
Btss1	57 a 82 cm	50,23	43,78	33,27
Btss2	82 a 106 cm	40,81	43,10	31,92
2Btssk	106 a 170 cm	35,16	39,75	28,51
2BCK	170 a 190 cm	35,48	36,90	25,97
3Btk	190 a 280 cm	34,82	43,47	32,39

Bajo del Perfil de Los Hornos				
Horizonte	Profundidad	Humedad Equivalente	CC	PMP
A1	0 a 19 cm	29,17	30,17	25,32
A2	19 a 30 cm	24,47	28,74	25,19
BA	30 a 46 cm	32,32	28,17	23,60
Btss1	46 a 70 cm	39,95	30,80	26,54
Btss2	70 a 90 cm	30,74	33,53	28,92
Btss3	90 a 102 cm	29,24	34,19	27,59
BC1	102 a 120 cm	34,48	33,15	24,69
BC2	120 a 138 cm	32,10	32,33	25,78
2Ck	138 cm a +	29,07	27,41	21,02

Cresta del Perfil de Los Hornos				
Horizonte	Profundidad	Humedad Equivalente	CC	PMP
A1	0 a 18 cm	36,92	32,86	29,14
A2	18 a 28 cm	29,06	29,25	24,64
BA	28 a 60 cm	32,39	43,51	37,25
Bt1	60 a 90 cm	40,24	33,53	26,35
BC1	90 a 120 cm	33,59	36,42	30,11
BC2	120 cm a +	31,01	31,93	24,69

Análisis de Porosidad

Bajo del Perfil de La Paz			
Horizonte	Profundidad	DAP	Pt
A1	0 a 12 cm	1,024	61,37
Bt1	12 a 36 cm	1,188	55,18
Bt2	36 a 71 cm	1,351	49,02
Bkss	71 a 88 cm	1,240	53,21
BCkss	88 a 109 cm	1,361	48,64
Ckss	109 cm a piso	1,091	58,84

Cresta del Perfi de La Paz			
Horizonte	Profundidad	DAP	Pt
A1	0 a 12 cm	1,089	58,92
AC1kss	12 a 42 cm	1,092	58,81
AC2Kss	42 a 73 cm	1,259	52,50
C1Kss	73 a 91 cm	1,248	52,90
C2k	91 cm a +	1,256	52,60

Bajo del Perfil de Castelar			
Horizonte	Profundidad	DAP	Pt
Ap	0 a 15 cm	1,171	55,803
A	15 a 22 cm	1,387	47,665
Bt	22 a 57 cm	1,286	51,461
Btss1	57 a 80 cm	1,322	50,109
2Btss2	80 a 120 cm	1,414	46,659
2Btk1	120 a 150 cm	1,191	55,041
2Btk2	150 a 248 cm	1,241	53,172

Cresta del Perfil de Castelar			
Horizonte	Profundidad	DAP	Pt
Ap	0 a 18 cm	1,20323	54,60
A	18 a 26 cm	1,31106	50,53
Bt	26 a 57 cm	1,20000	54,72
Btss1	57 a 82 cm	1,29848	51,00
Btss2	82 a 106 cm	1,27296	51,96
2Btssk	106 a 170 cm	1,21276	54,24
2BCk	170 a 190 cm	1,23143	53,53
3Btk	190 a 280 cm	1,17885	55,52

Bajo del Perfil de Los Hornos			
Horizonte	Profundidad	DAP	Pt
A1	0 a 19 cm	1,226	53,73
A2	19 a 30 cm	1,293	51,22
BA	30 a 46 cm	1,396	47,32
Btss1	46 a 70 cm	1,302	50,86
Btss2	70 a 90 cm	1,293	51,20
Btss3	90 a 102 cm	1,254	52,70
BC1	102 a 120 cm	1,290	51,30
BC2	120 a 138 cm	1,248	52,91
2Ck	138 cm a +	1,396	47,31

Cresta del Perfil de Los Hornos			
Horizonte	Profundidad	DAP	Pt
A1	0 a 18 cm	1,142	56,92
A2	18 a 28 cm	1,222	53,89
BA	28 a 60 cm	1,220	53,96
Bt1	60 a 90 cm	1,251	52,80
BC1	90 a 120 cm	1,152	56,54
BC2	120 cm a +	1,327	49,94