

## Estudio de la génesis del material madre de un vertisol en la unidad “La Carolina”: Incidencia de las anfíbolitas en el proceso propuesto

Bossi, J.<sup>1</sup> y Ortíz, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Suelos y aguas, Facultad de Agronomía Montevideo. Uruguay.

Correo electrónico: jbossi@fagro.eedu.uy

Recibido: 12/12/06 Aceptado: 30/7/07

### Resumen

El estudio de vertisoles rúpticos lúvicos con microrrelieve gilgai en el área tipo de la unidad de asociaciones de suelos “La Carolina” ha permitido demostrar que estos suelos pueden desarrollarse sobre rocas cristalinas básicas (anfíbolitas en este caso) siempre que exista un proceso previo de intensa meteorización. Tanto en sondeos edafológicos como en calicatas se observó que sobre la anfíbolita se forma una capa de limo con magnitudes superiores a dos metros de espesor en condiciones paleoclimáticas más cálidas y húmedas que las actuales, por la presencia de caolinita, hace 1.7 millones de años. Ese limo contiene abundante arena gruesa, bloques de hasta tres kilos en suspensión, dominio de epidoto y hornblenda en las arenas y presenta pruebas de deslizamiento posterior a su formación. Sobre ese limo más o menos erosionado se forman vertisoles de edad supuesta de  $6000 \pm 2000$  a BP; conservados como paleosuelos datables en Entre Ríos-Argentina, por hundimiento isostático relativo. En la actualidad, con régimen isohigro desde hace  $3000 \pm 500$  años se conserva el microrrelieve, las fracturas verticales, caras de deslizamiento y alto contenido de esmectitas, pero ha desaparecido el doble perfil en algunas zonas y el horizonte A ha perdido arcilla (contiene  $< 30\%$ ) por eluviación y formación de un horizonte Bt. El hallazgo geológico más importante y de enorme importancia agronómica es que el limo sobre el que se desarrolló el vertisol es producto de meteorización de anfíbolitas y no es el resultado de la acumulación eólica. Una hipótesis relevante es que con las predicciones de evolución climática en Uruguay estos suelos van perdiendo las características vérticas y asemejándose a sus pares melánicos los brunosoles, manteniendo la fertilidad natural y favoreciendo su manejo. Este estudio sirve además para sugerir la causa de la asociación de vertisoles y brunosoles sin límites definidos, tan común en Uruguay por su actual clima isohigro.

**Palabras clave:** vertisoles, material madre, limos, génesis, anfíbolitas

### Summary

## Study about the parent material genesis of a vertisol in “La Carolina” unit: Incidence of amphibolites in the proposed process

The study of udolls with gilgai microrelief in the soil association “La Carolina” area type has allowed to demonstrate that soils can be developed from basic metamorphic rocks if a previous process of intense weathering took place. As much in soundings as in test pits, it was observed a more than 2 meters siltstone layer over amphibolitic rocks. This layer was produced under warmer and more humid paleoclimatic conditions than the present days ones, because silty rocks contain kaolinite. The age of weathering is about 1,7 million years B.P. The siltstone contains heavy sand minerals (mainly hornblende and epidote) and up to 3 kg blocks of pegmatite composition, showing a flow process after their formation. Over these siltstones – more or less eroded – were developed the udolls with an age of  $6000 \pm 2000$  years, conserved as paleosols in the Entre Rios province (Argentine) by isostatic relative deeping. At the present time with isohygro regime sustained from  $3000 \pm 500$  years B.P., gilgai microrelief, vertical fractures and sliche slides are conserved, but the double perfil in some zones has disappeared; the A horizon has lost clay material and developed a Bt horizon. The most important geologic finding with a big agricole importance is that the siltstone

over which is developed the analyzed udoll is the product of amphibolite weathering and not the result of aeolian dust accumulation. Climate evolution predictions in Uruguay make very feasible the hypothesis that these melanitic soils will lose the vertic characteristics resembling brunosoles, maintaining their present fertility and favoring its handling. This study allows at else to suggest why the association vertisoles-brunosoles without defined limits, is so common in Uruguay under isohygro climate conditions.

**Key words:** vertisols, parent material, siltstone, genesis, amphibolites

## Introducción

Según la clasificación uruguaya, (Durán, 1991) todo vertisol debe poseer una o más de las siguientes características:

1. Evidencias de movimiento entre 25 y 100 cm creando caras de deslizamiento
2. Evidencias de automezclado con inclusiones de un horizonte en otro
3. Autogranulado
4. Microrrelieve

Los vertisoles son suelos muy fértiles con alto porcentaje de esmectitas que se forman en condiciones climáticas bien contrastadas. Ello conduce a dilataciones y contracciones de las arcillas según el contenido de agua, generando los movimientos de masa que caracterizan parte de este gran grupo de suelos. Los únicos Vertisoles conocidos en clima isohigro (100 mm/mes) y melánicos (> 6 % materia orgánica) se ubican en la cuenca del Plata como lo resalta Durán (1991). Este hecho motivó la sugerencia de Bossi *et al.*, (2004) que en principio pueden derivarse de cualquier material capaz de formar esmectitas por contener  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Fe}^{+++}$ ,  $\text{Si}^{++++}$ : limos, areniscas arcillosas o rocas básicas. Para permitir movimientos verticales de masa, el sustrato debe ser plástico, lo que ha generado las controversias sobre su origen ya que si derivan de rocas básicas pueden contener oligoelementos de gran interés agronómico ( $\text{Ni}^{++}$ ,  $\text{Co}^{++}$ ).

La génesis de vertisoles es un tema relevante para el sector agrícola porque son suelos muy fértiles pero de manejo dificultoso. Son muy duros cuando secos (humedad debajo del límite plástico) y muy pegajosos cuando el contenido de agua supera el límite líquido.

Debido a que pueden tener diversos procesos genéticos sería posible pensar en comportamientos diferenciales según la procedencia y su posterior evolución en clima isohigro.

Diversos autores precedentes atribuyen la génesis de los vertisoles a la edafización de un limo eólico cuaternario (fm. Libertad) pero Bossi *et al.* (2004) sugieren 3 unidades con Brunosoles y Vertisoles domi-

nantes que podrían generarse a partir de rocas básicas por la fuerte correlación geométrica entre su distribución areal y las componentes litológicas básicas del subsuelo: Unidad Itapebí – Tres Árboles sobre rocas basálticas; Unidad La Carolina sobre un complejo metamórfico de anfibolitas y gneisses proterozoicos; Unidad Isla Mala sobre un cinturón orogénico de composición variable con gabros, metabasaltos y filones de microgabro.

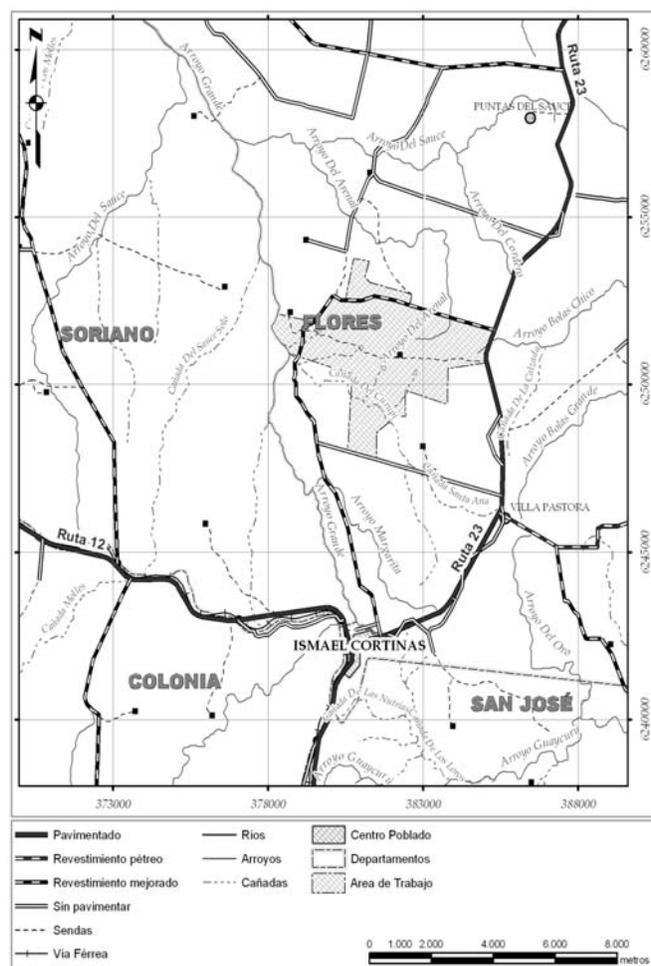
Con el apoyo de la (CSIC) y del departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía se comenzó un programa de estudio de vertisoles en áreas con predominio de rocas básicas cristalinas (basaltos, gabros, anfibolitas, prasinitas,.....) para establecer los mecanismos de génesis y evolución. Se entendió conveniente comenzar por la unidad La Carolina por presentar un subsuelo de heterogeneidad intermedia: ni tan heterogénea como el Cinturón San José ni tan homogénea como el grupo Arapey.

Los resultados obtenidos sugieren condiciones genéticas novedosas y de interés edafológico, como para merecer su comunicación científica en una revista de difusión regional.

## Ubicación y descripción del área de estudio

El área relevada en detalle se encuentra en el Departamento de Flores, (km162,500 de la ruta nacional N°23) coincidiendo con la foto aérea a escala 1/20.000, N°11-085. cuyo centro geométrico posee CPx=382 y CPy=6281, comprendida en la hoja topográfica a escala 1/50.000 M24 "Guaycurú" del (S.G.M.) La zona en estudio, se encuentra en el predio correspondiente al Establecimiento "La Carolina" de la Universidad del Trabajo que abarca una superficie aproximada de 1600 ha. (Figura 1).

El predio presenta relieve ondulado, de lomas con laderas largas, planas a convexas, con pendientes suaves (1-3 %), separadas por estrechas zonas bajas. Hay tres vías de drenaje siendo la principal el Arroyo Grande que discurre con dirección Este – Oeste limitando el borde sur del predio.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio con relación a la localidad Ismael Cortinas.

El clima es mesotérmico subhúmedo, con veranos calurosos e inviernos suaves. La temperatura media anual al abrigo es de 17° C. Las precipitaciones alcanzan un registro anual promedio de 1074 mm. Si bien hay pequeñas diferencias estacionales en las precipitaciones, debido a las condiciones de evapotranspiración existe una estación con déficit de humedad (fines de primavera-verano) y una estación en que el suelo es lixiviado (otoño-invierno).

Los vertisoles son rúpticos lúvicos con desarrollo de microrrelieve gilgai fácilmente identificables en foto aérea a escala 1/20.000. Ocupan principalmente las zonas cuspidales de las colinas.

## Antecedentes

La unidad de asociaciones de Suelos “La Carolina” fue definida por Brasesco y Sganga (1976) en el predio de la Escuela de (UTU). Está integrada por brunosoles éutricos típicos Fr. y vertisoles rúpticos lúvicos Fr. como suelos dominantes y brunosoles éutricos y subéutricos lúvicos Fr. Describen en detalle un vertisol en sus fases superficial y profunda en los términos expuestos en el cuadro 1.

Las conclusiones extraídas en varias tesis desarrolladas en la estancia Las Palmas permiten conocer con mucho detalle varios parámetros esenciales para los objetivos perseguidos en este ensayo. Elliot y Manfredini, (1988) determinaron la naturaleza y cantidad relativa de los minerales arcillosos de los vertisoles por (D.R.X) encontrando predominio de esmectitas seguido de illita y débil proporción de caolinita. Simpson y Pérez, (1984) exponen abundantes datos sobre granulometría de cada horizonte así como C.I.C con predominio de  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ . Ponce de León, (1984) y Elliot y Manfredini, (1988) realizan y relevan en detalle una calicata de 9 metros y un esquema morfológico de una topolitosecuencia donde quedo demostrado que los vertisoles se desarrollan con doble perfil sobre rocas limosas. (Figura 2).

El relevamiento geológico realizado en el área para caracterizar el sustrato sobre el cual se desarrollan los vertisoles rúpticos lúvicos no permitió reconocer rocas cristalinas básicas pero en realidad no se dispuso de observaciones litológicas en extensas áreas sin afloramientos. La expresión en foto aérea del microrrelieve gilgai (diseño en plumas) se desarrolla sobre diferentes materiales geológicos: granitoides, areniscas cretácicas y lodolitas.

La comparación de los parámetros utilizados para la ubicación de los vertisoles en determinada Unidad de Asociaciones de Suelos, muestra similitudes de tal magnitud que no permiten discriminar entre las unidades “La Carolina”, Isla Mala y Trinidad a escala 1/1:000.000. Tanto es así que el área asignada a la unidad “La Carolina” en la carta de Reconocimiento de Suelos de 1976 y las diferentes tesis citadas, es hoy asignada a la unidad Trinidad en el Compendio de Suelos del Uruguay (versión digital 2004). Reuniendo estos antecedentes y haciendo hincapié en la asociación de suelos que define la unidad “La Carolina”, se hizo imprescindible realizar los estudios en el área tipo (predio de la Escuela Agraria homónima) para establecer la posibilidad de génesis a partir de rocas cristalinas básicas.

**Cuadro 1.** Descripción del vertisol de la localidad tipo “La Carolina”, según Brasesco y Sganga (1976).

**FASE SUPERFICIAL**

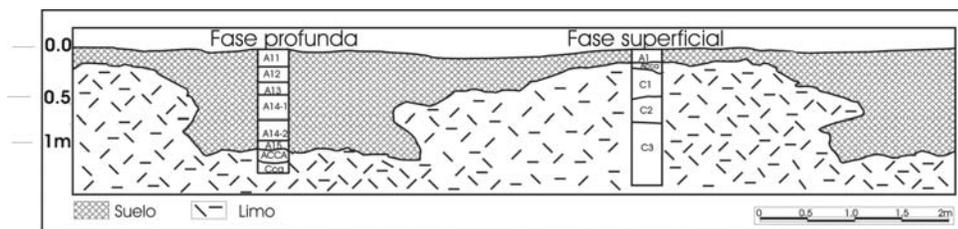
0-15m	A <sub>1</sub>	Negro (10 YR 2/1; franco arcilloso con pocas gravillas; bloques subangulares pequeños, moderados; plástico; raíces abundantes; reacción al HCl: moderada; transición clara.
15-25cm	AC <sub>ca</sub>	Pardo (10YR 5/3) y negro (10YR 2/1); arcilloso con pocas gravillas; bloques subangulares medios, moderados; plástico; raíces comunes; reacción al HCl: fuerte; transición gradual.
25 y+ cm	A <sub>11</sub>	Pardo (10YR 5/3); arcilloso con poca gravilla; prismática medios, moderados; películas de arcilla delgadas; plástico; pocas raíces; concreciones e calcio comunes, pequeños, friables; reacción al HCl: fuerte.

**FASE PROFUNDA**

0-13 cm	A <sub>11</sub>	Negro (10YR 2/1); rango arcilloso; bloques subangulares pequeños, débiles; plástico; abundantes raíces; transición clara.
13-31 cm	A <sub>12</sub>	Negro (10YR 2/0); franco arcilloso; bloques subangulares medios, débiles; ligeramente plástico; raíces abundantes; transición abrupta.
31-73 cm	B <sub>2</sub>	Negro (10YR 2/1); arcilloso, prismas grandes, fuerte; películas de arcilla delgadas, continuas; plástico; caras de deslizamiento; pocas raíces; transición abrupta.
73 y + cm	C <sub>ca</sub>	Pardo (10YR 5/3) arcilloso, prismas grandes, moderados; películas de arcilla delgadas, continuas; plástico; pocas raíces; concreciones de calcio comunes, medios y grandes, friables; reacción al HCl: fuerte.

Fase	Horizonte	Profundidad (cm)	Análisis granulométrico (%)			pH	M. O %*	CIC**	Ca++	Mg++
			Arena	Limo	Arcilla					
Superficial	A1	0 - 15	31.50	32.24	36.26	7.7	6.6	36	33	2
Fase superficial	AC <sub>ca</sub>	15 - 25	23.63	33.66	42.71	8.0	2.6	33	30	2
profunda	C <sub>ca</sub>	+ 25	25.43	31.44	43.13	8.0	0.6	28	21	7
profunda	A <sub>11</sub>	0 - 13	30.06	40.23	29.71	6.1	7.3	33	26	4
	A <sub>12</sub>	13 - 31	28.70	43.13	28.17	6.1	7.0	31	23	4
	B <sub>2</sub>	31 - 73	27.08	32.86	40.06	7.6	2.7	38	26	10
	C <sub>ca</sub>	73 +	27.26	25.43	47.31	8.0	0.2	30	17	9

\* Porcentaje de materia orgánica. \*\* Capacidad de intercambio catiónico.



**Figura 2.** Calicata en la estancia La Palma mostrando las dos fases de un vertisol según Ponce de León 1984.

## Materiales y métodos

La metodología de trabajo consistió en estudiar en detalle las zonas con microrrelieve dentro del área de la escuela agraria de (U.T.U) “La Carolina”.

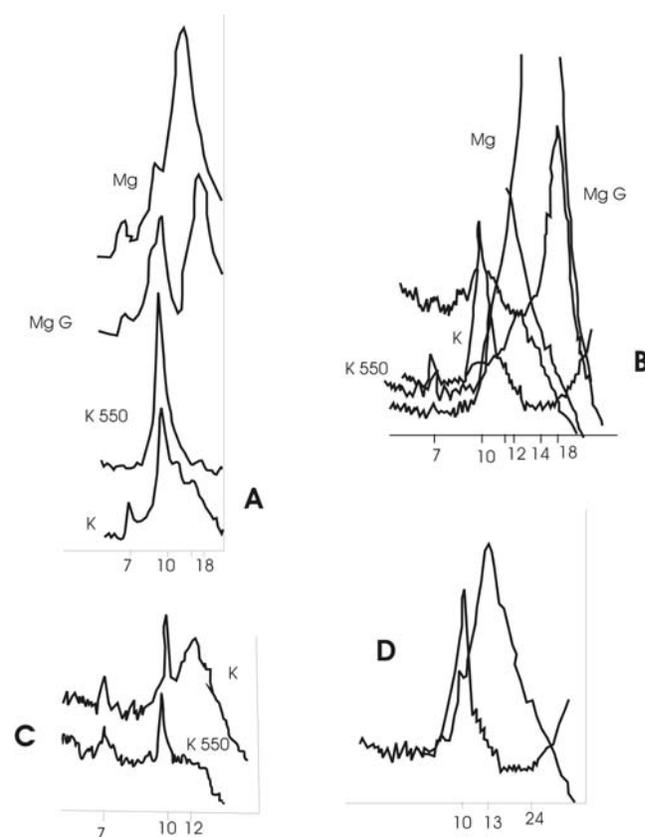
La identificación de las zonas con microrrelieve en ondas. Se consiguió con gran exactitud utilizando fotos aéreas 1/20.000 de la misión 1966 del (S.G.M) mejoradas con el manejo digital de imágenes en el programa Corel, ensayando distintos grados del contraste y brillo en diferentes escalas.

El paso siguiente ha sido verificar que el suelo desarrollado en las áreas con microrrelieve, presentaba características vérticas, utilizando descripciones con taldadro edafológico. De estos sondeos se extrajeron muestras de los horizontes C (> 1m de profundidad) para estudio de laboratorio. En uno de los sondeos se extrajeron muestras de cada horizonte porque presentaba las características típicas de los suelos del área. Los análisis de laboratorio se orientaron a estudios de granulometría (método Bouyoucus) y mineralogía de las arenas en sus distintos tamaños: con lupa para granos > 0.25 mm y frotis al microscopio para las fracciones menores (0.2–0.08 y 0.074–0.05mm). Pareció de menor significación la determinación de los minerales arcillosos porque se contó con datos suficientes de (D.R.X) de vertisoles pertenecientes a la unidad La Carolina Elliot y Manfredini (1988) y horizontes C de brunsoles de la Unidad Tala Rodríguez Prandi, (1984). La verificación de que resultaban composiciones similares, como se ve en la figura 3 restó importancia a la determinación mineralógica de las arcillas. La carta geológica a escala 1/40.000 se relevó para identificar la naturaleza del subsuelo con un grado de precisión tal que permitiera identificar las zonas más representativas.

La etapa definitoria para relacionar vertisoles con rocas cristalinas básicas se apoyó en la excavación de una calicata de 20 metros de longitud y profundidad suficiente (aprox. 3 metros) hasta llegar a las rocas cristalinas. Esta calicata se desarrolló con rumbo perpendicular a la dirección del microrrelieve. Se describió en detalle un perfil de suelo y se tomaron muestras del suelo y de los limos subyacentes para estudiar los en el laboratorio.

## Área “La Carolina”

Fue en esta zona donde se lograron resultados suficientemente coherentes como para poder extraer conclusiones válidas sobre génesis y evolución de vertisoles



**Figura 3.** Curvas de RX de arcillas de horizontes C; A- Suelos de Prandi, 1984; B-C y D Suelos superficiales de estancia La Paloma Elliot y Manfredini 1988; Mg –saturado de magnesio; MgG – glicolada; K –saturada de potasio; K-550 calentada a esa temperatura.

rúpticos lúvicos. Por ese motivo se tratarán en detalle los antecedentes geológicos y edafológicos así como los trabajos realizados.

## Antecedentes geológicos

Se reducen a lo expuesto por Garat (1990) a escala 1/100.000 y la Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500.000 de Bossi y Ferrando (2001). En ambos casos la información geológica se limita a la faja Florida *sensu* Bossi y Navarro (1991) y sedimentos de la fm. Libertad. La faja Florida es una asociación infracrustal integrada por migmatitas, gneisses, anfibolitas y granodioritas de anatexis, cabalgada entre dos cinturones orogénicos EW de grado bajo de metamorfismo. Garat (1990) describe las unidades reconocidas según se expone a continuación.

**Formación Libertad:** lodolitas macizas pardas friables con arena gruesa dispersa y con presencia de carbonato de calcio en formas variadas. La presencia de minúsculos cristales de yeso es también un rasgo casi omnipresente.

**Diques Básicos:** filones de composición gabrodiorítica toleítica, subparalelos de espesor variable de 10 a 40 metros con rumbo general N60-70E.

**Granodiorita del Arroyo Guaycurú:** este cuerpo se encuentra entre una faja milonítica y metamorfitos de grado medio sobre el arroyo homónimo. Se trata de una granodiorita gris de grano medio a grueso, con biotita en nidos, discordante con las estructuras de la roca caja.

**Metamorfitos de grado medio:** afloran en la zona central y norte de la hoja Guaycurú, con rumbo general N60-70E y buzamientos variables. Están constituidos por gneisses de grano medio a grueso, con anfíbol y biotita, muy alterados, alternando con niveles máficos (anfíbolitas). Estas litologías se encuentran afectadas por intensas deformaciones en fase plástica y constituye el material dominante en el área estudiada.

### Antecedentes edafológicos

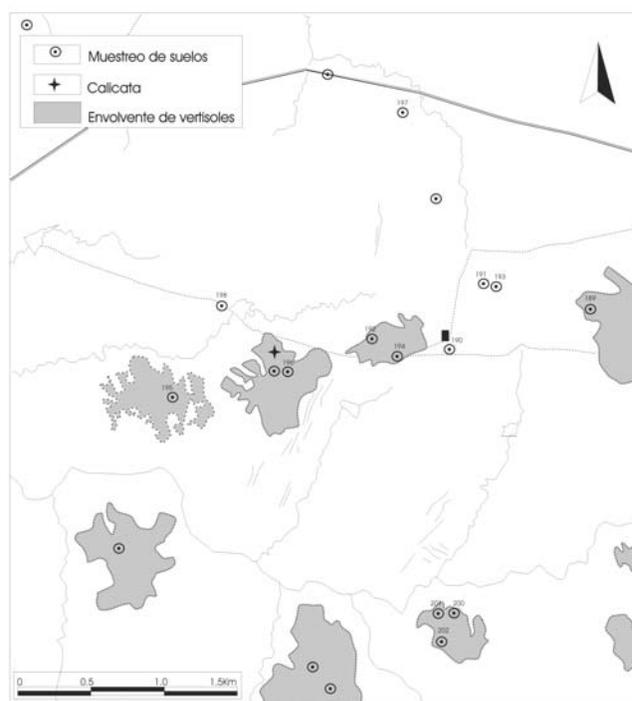
El único antecedente cartográfico de detalle disponible para la zona es la carta CONEAT, donde los grupos de suelos principalmente allí desarrollados son 10.12 y 5.02. El Grupo 10.12 es de gran significación territorial en la región del Terreno Piedra Alta sensu Bossi *et al.* (2005) El material geológico corresponde a sedimentos limo arcillosos de 1 a 8 metros de potencia, apoyados sobre el basamento cristalino. El relieve es ondulado a ondulado suave, con pendientes de 2 a 5%. Los suelos predominantes corresponden a Vertisoles Rúpticos Lúvicos (Grumosoles) y Brunosoles Éútricos Típicos Lúvicos (Praderas Negras vertisolicas), de color negro, textura franca a franco arcillosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados. El Grupo 5.02 se desarrolla en los departamentos de Flores y Florida en zonas de relieve ondulado y ondulado fuerte, con pendientes de 5 a 7%. El material geológico corresponde a litologías variables de rocas. Los suelos son Brunosoles Subéútricos Háplicos moderadamente profundos y superficiales a los que se asocian Inceptisoles (Litosoles) a veces muy superficiales. El horizonte superior es de textura franca, franco gravillosa o arenoso franca con gravillas abundantes; la fertilidad es media a baja. La rocosidad es moderada y varía entre 2 y 10% del área.

La Dirección de la Escuela Agraria cedió un documento anónimo con la carta de suelos a escala 1/20.000

donde se separan 7 grandes grupos de suelos. En la descripción general se señala que el material generador de dichos suelos se trata de basamento cristalino, con componentes gnéissicos y también en el caso de los suelos melánicos un material más básico, dado el carácter del producto de alteración. A pesar de ser ilegible la carta de suelos en el documento a que se tuvo acceso esta consideración final es muy significativa porque asocia los suelos melánicos a rocas básicas.

### Trabajo realizado

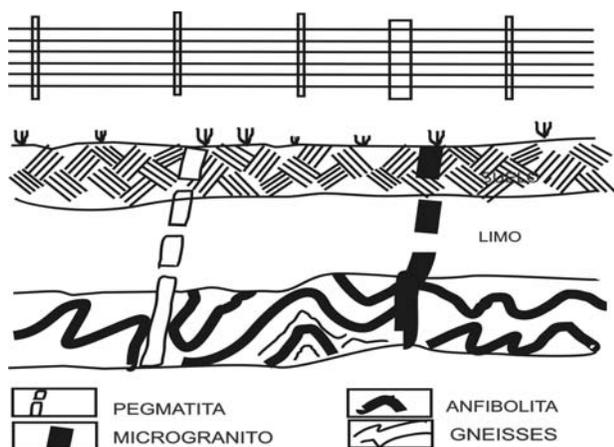
En base a los antecedentes disponibles se comenzó por fotointerpretar el área de la Escuela Agraria sobre fotos aéreas a escala 1/20.000 tratadas para identificar las zonas ocupadas por suelos con microrrelieve gilgai (Figura 4). Cada una de estas zonas fue perforada con taladro edafológico para establecer el grado de correlación entre las observaciones de campo y la fotointerpretación. Una zona representativa por poseer microrrelieve bien definido, y bloques decimétricos de pegmatita y microgranito en superficie, fue perforada en el punto 196 y dio como resultado los siguientes perfiles de 1m 20 de espesor: fase profunda A Bt1 Bt2 BC C; fase superficial A C C<sub>Ca</sub>.



**Figura 4.** Carta de ubicación de las áreas ocupadas por vertisoles y puntos de observación referidos en el trabajo.

mientos con estructura filoniana son rumbo dominante NS (Figura 6).

La información recogida de la fotointerpretación, los sondeos con taladro holandés, los perfiles geológicos dentro y fuera del predio de la Escuela Agraria La Carolina y los estudios de laboratorio sobre granulometría y mineralogía de arenas de los suelos y las rocas limosas de la base, sugería que los vertisoles se formaban a par-



**Figura 6.** Esquema geológico de la estructura observada en la cuneta del camino del sur del área estudiada.

tir de limos que eran el producto de meteorización de un sustrato rocoso rico en anfibolita.

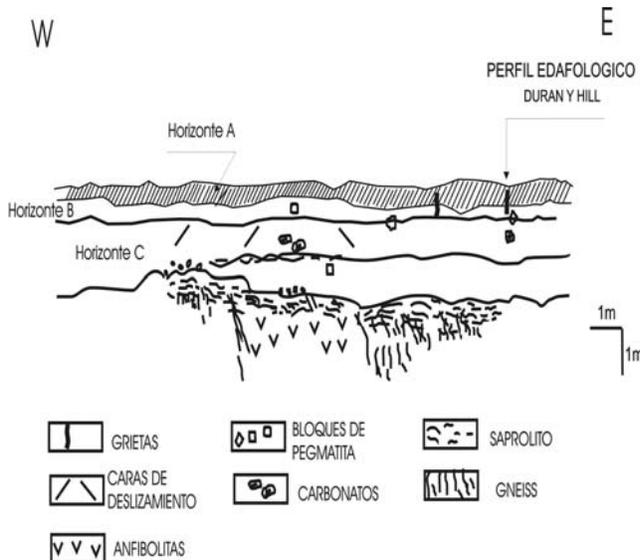
A pesar de ello no se había observado ningún perfil que explicara el verdadero proceso de transformación del sustrato lítico en vertisol. Fue entonces necesario realizar la excavación de una calicata de dimensiones suficientes como para permitir analizar ese proceso de transformación tanto desde el punto de vista naturalista en base a la morfología y relación geométrica de cada roca, así como desde el punto de vista genético comparando datos petrográficos de cada unidad.

### Calicata

La calicata fue ubicada con rumbo EW en el borde norte de una de las áreas con microrrelieve gilgai de la que se conocía el perfil de la fase profunda (Muestra 196) con datos macroscópicos, granulométricos y mineralógicos de cada horizonte. La excavación en una zona de microrrelieve con ejes NS identificada por foto aérea 1/20.000 misión 1966, permitió realizar una serie de observaciones y medidas que constituyen un importante avance a la pedogénesis de vertisoles en la Uni-

dad La Carolina. Los suelos con horizontes A, B y C están apoyados sobre un limo con cantidades variables de carbonatos de concreciones pulverulentas de 3 a 5 cm de diámetro. Las rocas de base representan una alternancia de gneisses biotíticos y anfibolitas de rumbo N60E verticales y las anfibolitas se encontraron en una zona con mucho carbonato en el limo suprayacente.

En la figura 7 se muestran las principales características de la cara sur de la calicata referida.



**Figura 7.** Cara sur de la calicata excavada en el borde de un área con microrrelieve gilgai al norte del punto 196 de la figura 4.

El perfil edafológico realizado en la calicata, por los Profesores Ing. Agr. Artigas Durán y Mariana Hill, dio los resultados que se expresan en los cuadros 2 y 3.

El suelo presenta una profundidad variable con valores próximos a los 80 cm ( $\pm 10$  cm). El horizonte calcáreo no es continuo presentando en la parte inferior una débil reacción de carbonatos.

Hasta los 24 cm hay grietas alargadas e irregulares y entre 24 cm y 80 cm hay grietas verticales de 30 a 50 cm de longitud y hasta 2 cm de ancho, separadas no más de 10 cm.

Hasta 80 cm la masa de suelo absorbe muy lentamente el agua, y de allí hacia abajo el suelo se encontraba húmedo.

La constante existencia de una capa de limo debajo de los vertisoles en distintas zonas de Uruguay condujo a analizar el tema en su conjunto para encarar la génesis de dichos limos.

**Cuadro 2.** Descripción de un perfil completo de la calicata realizado según datos de Prof. A. Durán e Ing. Agr. M. Hill.

PROFUNDIDAD (cm)	
0-24	Pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en seco; Negro (10 YR 2/1) en húmedo; franco arcilloso; bloques subangulares medios, moderados; muy duro a extremadamente duro en seco; poros muy finos; raíces abundantes; transición clara.
20-40	Negro (10 YR 2/1) en seco; arcilloso; bloques angulares gruesos, fuertes; películas de arcilla pardo oscuro (7.5 YR 3/2) delgadas, discontinuas; muy duro a extremadamente duro en seco; raíces abundantes; transición gradual.
40-62	Negro (10 YR 2/1) en seco; arcilloso con menos de 3% de gravas subredondeadas; bloques gruesos, fuertes; películas de arcilla pardo oscuro (7.5 YR 3/2) delgadas discontinuas a continuas; caras de deslizamientos comunes, muy duro a extremadamente duro en seco; raíces comunes; transición gradual.
62-80	Pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; arcilloso con menos de 3% de gravas subredondeadas; bloques medios a gruesos, moderados; películas de arcilla pardo oscuro (7.5YR 3/2) delgadas continuas; caras de deslizamiento comunes, muy firme en húmedo; poros muy finos; raíces comunes; transición clara.
80-94	Pardo oscuro (10YR 3/3) en húmedo; arcilloso con menos de 3% de gravas subredondeadas con algo de arenas gruesas; bloques subangulares medios a gruesos moderados; películas de arcilla pardo oscuro (7.5YR 3/2) delgadas continuas; caras de deslizamiento comunes, muy firme en húmedo; raíces escasas; transición clara.
94-138	Pardo (10YR 4/4) en húmedo; franco arcilloso con menos de 3% de gravas subredondeadas; bloques angulares medios moderados a débiles; películas de arcilla pardo oscuro (7.5YR 3/2) delgadas y muy discontinuas; friables, poros muy finos; raíces muy escasas; transición clara e irregular, mezcla de horizontes.
138-174	Pardo (7.5YR 5/4) y pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo; franco arcilloso con gravillas; bloques subangulares medios moderados a débiles; películas de arcilla pardo oscuro (7.5YR 3/2) delgadas y en manchas; friable, poros muy finos; raíces muy escasas; transición gradual e irregular, mezcla de horizontes.
174-205	Pardo (7.5YR 5/4) y pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo; franco arcilloso con gravilla; bloques subangulares medios débiles; películas de arcilla pardo oscura (7.5YR 3/2) delgadas y discontinuas. Nódulos de CaCO <sub>3</sub> gris claro (10YR 7/2), blandos de 3 a 10cm. De sección; friable, poros muy finos, muy escasos; transición gradual e irregular, mezcla de horizontes.

## Limos

La constante existencia de una capa de limo debajo de los vertisoles en distintas zonas del país condujo a analizar el tema en su conjunto para encarar la génesis de dichos materiales.

En Uruguay se reconocen varias unidades geológicas constituidas por limos masivos friables de color pardo anaranjado: son el (Miembro San Bautista) de la Fm Raigón, Ortiz (2002); la Fm. Libertad, Goso y Bossi (1966); Fm Dolores, Antón y Goso (1974) y Fm. So-pas, Antón (1975).

Los limos del área "La Carolina" fueron atribuidos por Garat (1990) a la Fm. Libertad, que en su descripción original comprende lodolitas dominantes y loess discontinuos base de la formación. Las lodolitas son rocas limosas friables, con arena gruesa o gravilla en partículas dispersas suspendidas en la masa, sin estratificación; son de color pardo anaranjado y presentan CaCO<sub>3</sub> en diversas formas, son rocas friables sin ninguna cohesión y en las paredes de fuerte pendiente la película exterior muestra un típico resquebrajamiento poligonal cuando se seca; desde el punto de vista granulométrico contiene 20 % arena, 40 % limo y 40 %

**Cuadro 3.** Datos analíticos del perfil descrito según A. Dirán y M. Hill.

Profundidad (cm)	horizonte	Cationes Meq/100g							Granulometría %		
		pH		CIC*					Arena	Limo	Arcilla
		H <sub>2</sub> O	M.O% <sup>‡</sup>	K	Ca	Mg	Na	*			
0-24	A	5.5	7.1	0.32	11.5	3.6	0.37	16	21	54	25
24-40	Bt1	6.2	3.0	0.55	17.4	5.7	1.3	25	16	43	41
40-62	Bt2	7.2	1.8	0.66	21.5	7.5	1.6	32	16	38	45
62-80	Bt3	7.8	1.8	0.57	21.8	7.4	1.8	32	15	43	42
80-94	C1	8.2	0.7	0.55	21.4	7.3	1.4	32	16	43	41
94-138	C2	7.9	0.1	0.65	16.2	5.5	1.9	25	16	52	31
138-174	C3	8.0	0.0	0.68	25.9	5.7	1.5	38	24	45	31
174-206	C4								23	41	35

\* Materia orgánica.

\*\* Capacidad de intercambio catiónico.

arcilla. El loess masivo de color pardo anaranjado poroso con grado de diagénesis superior a la lodolita, no presenta carbonatos y la disyunción es prismática cuando seco; estos loess contienen más del 50 % de fracción limo y < del 1 % de arena gruesa; en la mayoría de los casos no contienen granos > a 0.25 mm permitiendo suponer un origen eólico para el transporte y sedimentación.

Un reciente trabajo demostró que las lodolitas de la Fm. Libertad eran el producto de meteorización del loess inferior y que a su vez este loess constituye el miembro San Bautista de la formación Raigón. Ortiz *et al.* (2006) encuentran criterios paleoclimáticos y paleontológicos para sugerir que los loess naranjas de San Bautista se depositaron en el Pleistoceno inferior y la fm. Libertad (que en realidad es su producto de meteorización) se produjo en un óptimo climático de  $1.6 \pm 0.1$  M.a B.P.

Para dilucidar la génesis de los limos de la base de los suelos con características vérticas del predio de la (UTU) La Carolina, se entendió preferible el análisis de la granulometría y mineralogía de la fracción arena aunque se tuvo muy en cuenta la presencia sistemática de un débil porcentaje de caolinita como indicadora de un clima más cálido y húmedo que el actual.

Desde el punto de vista granulométrico los limos de La Carolina presentan importantes porcentajes de arena, tanto fina como gruesa. Todos los granos de arena, cualquiera sea su dimensión son angulosos, indicando ausencia de transporte por un medio fluido (Cuadros 4 y 5). En el mismo Cuadro se expone los datos granulométrico de Prandi (1984) obtenidos en los horizontes C de suelos desarrollados sobre limos en el Departamento de Canelones.

Desde el punto de vista mineralógico es significativa la presencia sistemática de biotita o vermiculita sin poderse cuantificar en todos los ensayos por su morfología laminar. Los valores cuantitativos de los diversos minerales integrantes de la fracción arena, entre 200 y 50 micras se obtuvieron a partir del conteo de 1000 granos en cuatro frotis y los resultados obtenidos se presentan en el cuadro 6.

Aunque el suelo del punto 198 no es un vertisol, se utilizó como referente de la mineralogía de las arenas de los productos de alteración y edafización de anfibolitas porque se desarrolla sobre un potente banco de estas rocas en un perfil claramente expuesto en la barranca de una cañada donde se puede observar el pasaje gradual anfibolita – saprolito - suelo.

De estos datos resulta evidente que todos los vertisoles analizados en el área de "La Carolina" con-

**Cuadro 4.** Granulometría en % en peso de los limos del establecimiento La Carolina y de Canelones según Prandi (1984).**LA CAROLINA**

Muestras	Arena %		Limo %		Arcilla %
	>0.25mm	0.50-0.25 mm	0.05-0.02	0.02-0.005	0.005-0.002 <0.002
193	6	50	15		29
196	12	49	9		30
198 (anfíb.)	38	49	6		7
200	12	49	11		27
201	17	46	13		24
M3 VFP	12	47	14		27
M5 VFP	14	40	19		27

**CANELONES**

124	4	6	51	39	100
130	5	8	39	48	100
137	2	9	56	32	100
143	4	9	45	43	100
149	3	5	42	50	100

Arena gruesa: > 0.25mm  
 Arena fina: 0.05-0.25mm  
 Limos : 0.05-0.005mm  
 Arcilla: < 0.005mm

tienen minerales típicos de la meteorización de la anfíbolita: hornblenda, pístasita (epidoto) y andesina. De allí puede inferirse que los limos del horizonte C de los vertisoles provienen de estas rocas cristalinas básicas mediante un proceso que más adelante se define.

El suelo en el punto 196, que es una fase profunda de vertisol en la descripción de campo, fue estudiado en todo el perfil para definir la composición mineralógica de las arenas de tamaño < 74 micras que podrían provenir de aporte eólico alóctono. Los resultados mostraron que en todos los horizontes aparecen porcentajes importantes de hornblenda, epidoto y andesina en granos angulosos que necesariamente provienen de las anfíbolitas de a zona sin importante transporte. En el horizonte C no aparecen tampoco granos

redondeados de 0.1 – 0.2 mm de diámetro, confirmando la ausencia de aporte eólico.

En la formación Libertad y en el miembro San Bautista de Raigón en el balneario Kiyú del departamento de San José, tanto la granulometría como la composición mineralógica son radicalmente diferentes según muestra la siguiente.

Resulta evidente que los limos se han formado por alteración de rocas cristalinas con abundante biotita hornblenda, epidoto y plagioclasas An > 30 con un contenido menos importante de feldespatos alcalinos y no demasiado cuarzo. La capa de limo se forma cuando existan rocas capaces de librar Ca<sup>++</sup> Mg<sup>++</sup> y Fe<sup>++</sup> por meteorización como para generar esmectitas.

**Cuadro 5.** Granulometría de las arenas en los limos “La Carolina”; tamaño de grano en mm y % en peso.

Muestras	TAMAÑO DE GRANO				
	0.25	0.15	0.074	0.05	< # 325
189 C	62.30	26.20	7	4.10	0.20
190 C	62.95	28.76	5.63	2.40	0.26
191 C	59.10	36.40	3.80	0.20	0.05
194 C	53.45	34.21	10.77	0.75	0.85
196 A	33.01	51.28	12.71	1.34	1.66
196 Bt1	42.51	50.88	4.46	2	0.15
196 Bt2	41.25	43.33	13.35	0.51	1.56
196 BC	45.06	45.76	7.40	1.43	0.08
196 C	52.09	35.60	9.94	1.75	0.62
198 C	11.5	70.15	14.89	1.50	2.02
200 C	47.29	41.52	10.97	0.21	0

Los limos son macroscópicamente similares a los de la fm. Libertad sin embargo difiere en su mineralogía difieren y granulometría.

Esto permite sugerir que existen diversas fuentes de procedencia de los materiales constituyentes de los limos que se generan los vertisoles: loess eólico de San Bautista para la “fm. Libertad” de la fosa tectónica de Santa Lucía; rocas cristalinas básicas para la fm. Libertad sobre rocas cristalinas.

### Discusión

Los suelos constituyen un importante componente del medio físico, en tanto archivan la información de los factores físicos-geográficos acontecidos en un determinado espacio. El estudio de la posibilidad de formación de vertisoles sobre rocas básicas tiene enorme interés agronómico por la posibilidad de agregar a su fertilidad natural, la presencia de oligoelementos.

Durante el estudio en áreas pertenecientes a la unidad “La Carolina” según la carta de Reconocimiento de Suelos 1976 y la versión digital 2004 se han detectado extensiones diferentes, reduciéndose el área de la unidad “La Carolina” quedando la estancia “Las Palmas” fuera de ella, asignándose a la unidad Trinidad. Las tesis realizadas en dicha estancia representaban en su momento definiciones sobre la unidad “La Carolina” lo que muestra que los vertisoles rúpticos lúvicos

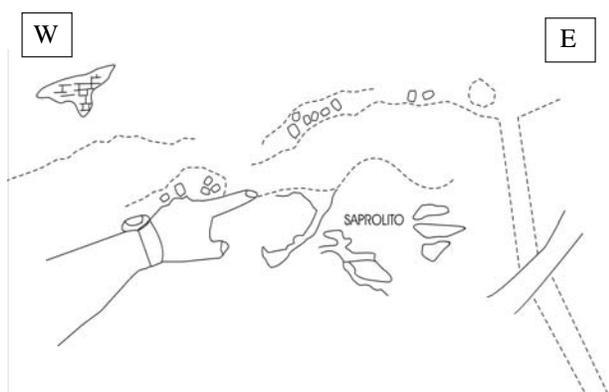
**Cuadro 6.** Mineralogía de arena de tamaño entre 80 y 50 micras de los vertisoles de “La Carolina”.

Muestra	horizonte	Hornblenda	Epidoto	Andesina	Feldespato	Cuarzo	Biotita
		K <sup>+</sup>					
189	C	14	15	48	8	16	2
190	C	2	9	76	3	6	3
191	C	3	19	52	3	24	1
194	C	4	16	48	1	32	-
198	C	46	1	34	-	-	19
200	C	1	5	65	18	10	1
201	C	2	19	52	3	24	1
Media sin198	C	4 ± 1	14 ± 2	56 ± 3	6 ± 2	18 ± 2	1

desarrollados sobre ambas unidades son semejantes pero independientes del material generador.

En el caso del estudio realizado en la escuela agraria de la (UTU) La Carolina, los suelos de carácter vértico se desarrollan sobre materiales cristalinos básicos.

Todas las áreas con microrrelieve gilgai que se sondearon poseían características vérticas y un material limoso entre el suelo y el sustrato cristalino; en el área más típica se excavó una calicata en la cual se pudo demostrar la siguiente secuencia de fenómenos: un proceso de intensa meteorización de rocas cristalinas con anfibolitas que conduce a la formación de limo encima del saprolito, ese limo presenta varias pruebas de la procedencia del material cristalino, como bloques angulosos en suspensión con un promedio de 5 cm. de arista, abundancia de arena gruesa y anfiboles. Presentando cierto contenido de caolinita que indica condiciones de clima húmedo y de mayor temperatura que la actual, hace unos 1.7–1.5 M.a Ortiz *et al.* (2006). En e óptimo climático se alteraron las rocas cristalinas aflorantes que generaron los limos que actualmente conservan poco espesor (2 a 3 metros). El dibujo expuesto en la figura 8 muestra la existencia de un flujo de barro que arrastro bloques pegmatíticos de un antiguo filón hacia el W. Se confirmó que el suelo deriva de la edafización de ese limo por la existencia de bloques decimétricos angulosos en ambos y el mantenimiento de la mineralogía de las arenas. El contraste entre el horizonte C del suelo y la roca alterada es irregular y variable, presentando zonas con paleopavimento, zonas calcáreas y zonas con pasaje gradual.



**Figura 8.** Detalle del contacto entre la anfibolita alterada y el limo suprayacente mostrando como el filón del este suministra fragmentos que son desplazados alrededor de un metro de su posición original hacia el oeste.

El sustrato cristalino es una alternancia polimétrica de anfibolitas y gneisses biotíticos. En las bandas anfibólicas aparece mayor concentración de calcáreo en el horizonte C o en el limo subyacente y es también donde se vio con nitidez niveles de saprolito y paleopavimentos de clastos de cuarzo pegmatíticos.

Esos suelos pueden haberse formado hace  $6000 \pm 2000$  a.B.P como plantea Iriondo a (2004) para los paleo vertisoles de la provincia de Entre Ríos (Rep. Argentina) Desde entonces la isostasia produce una elevación relativa de Uruguay. Eso permite cubrirse de aluviones y fosilizarse en Entre Ríos mientras se erosionan y experimentan eluviación que desdibuja el doble perfil en Uruguay.

En resumen el proceso evolutivo sería el siguiente:

- Clima árido a semiárido erosivo permitiendo aflorar rocas cristalinas.
  - Clima tropical transformando las rocas cristalinas en saprolito y limo pardo anaranjado con abundante vegetación y megafauna.
  - Clima semiárido eliminando la vegetación y permitiendo el flujo de barro.
  - Desarrollo de vertisoles sobre ese limo movilizado.
  - Destrucción del doble perfil al someterse a condiciones isohigras.
- Esa secuencia explica la mayoría de los fenómenos observados en el área de estudio:
- Bloques en suspensión en los limos y en los suelos.
  - Posibilidad de formación de vertisoles por un sustrato plástico.
  - Incidencia de las anfibolitas en la formación de ese limo.
  - Desaparición del doble perfil por eluviación y formación de horizontes Bt.
  - Conservación del microrrelieve gilgai.

### Conclusiones

El estudio del área tipo de la unidad de suelos La Carolina permitió extraer las siguientes conclusiones:

- Se han formado vertisoles rúpticos lúvicos sobre rocas cristalinas básicas con desarrollo de microrrelieve gilgai, fracturas abiertas casi verticales, caras de deslizamientos y mezcla de horizontes.
- Dicha génesis pasa por una etapa intermedia de meteorización subtropical a un limo anaranjado con grandes bloques de rocas filonianas y abundante hornblenda en las arenas.
- Esa capa de limo que no resulta de la acumulación de material eólico alóctono sino de la meteorización de

rocas cristalinas es la que permite los movimientos verticales de masa.

- En las actuales condiciones climáticas en la periferia de las áreas con vertisoles se destruyen algunos rasgos pero queda registro del proceso genético que los hace a veces confundir con brunosoles.
- En lo esencial el material genético debe contener  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Al}^{+++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  como para que con adecuadas condiciones topográficas y climáticas se formen estos suelos.
- Sobre rocas metamórficas (anfíbolitas) los vertisoles adquieren poco desarrollo y son vulnerables a ascensos isostáticos y/o climas isohigros.
- Una hipótesis relevante es que con las predicciones de evolución climática en Uruguay estos suelos van perdiendo las características vérticas y asemejándose a sus pares melánicos los brunosoles, manteniendo la fertilidad natural y favoreciendo su manejo. Este estudio sirve para sugerir la asociación de vertisoles y brunosoles sin límites definidos tan común en Uruguay por su actual clima isohigro.

### Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República y el Departamento de Suelos y Aguas de Facultad de Agronomía. A la Ay. Téc. Carmen Olveira quien se encargó de elaborar los cuadros y los dibujos así como procesar el texto para adaptarlos a las normas de la revista. Al profesor Artigas Durán así como a los Ings. Agrs. Mariana Hill y Álvaro Califra quienes contribuyeron en descripciones de perfiles, y en la orientación del trabajo sobre los suelos del área. Al Lic. Alejandro Schipilov y la Br. Silvia Maldonado en la descripción de la calicata contribuyendo a su interpretación.

### Bibliografía

- Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echeverría, A.; Panario, D. y Puente, R.** 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay Tomo I: Clasificación de suelos. MAP, Dirección de Suelos y Fertilizantes. Montevideo.
- Bossi, J.** 1966. Geología del Uruguay. Dpto. Publ. Universidad de la República.
- Bossi, J.; Durán, A. y Maldonado, S.** 2004. Algunas evidencias del desarrollo de vertisoles de Uruguay a partir de rocas cristalinas básicas, *Agrociencias* 8 (2): 45-60.
- Bossi, J. y Ferrando, L.** 2001. Carta Geológica del Uruguay a escala 1/500.000. Ed. Geoeditores, Montevideo, Uruguay.
- Bossi, J. y Navarro, R.** 1991. Geología del Uruguay. Universidad de la República, Uruguay.
- Bossi, J.; Ortiz, A. y Maldonado, S.** 2006. Posibilidad de Vertisoles sobre rocas básicas. Estudio de vertisoles sobre anfíbolitas y gneisses Escuela Técnico Agraria "La Carolina" departamento de Flores. Informe interno.
- Brasesco, R. y Sganga, J.** 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1/1.000.000. Montevideo, M.G.A.P. Dirección de Suelos y Fertilizantes.
- Durán, A.** 1991. Suelos del Uruguay. Ed. Hemisferio Sur, Montevideo. 398pp.
- Elliot, E. y Manfredini, A.** 1988. Caracterización de un Vertisol de la unidad La Carolina. Propiedades químicas y mineralógicas. Tesis de grado Facultad de Agronomía.
- Garat, I.** 1990. Carta Geológica del Uruguay a escala 1/100.000, Fotoplano Guaycurú. Conv. DINAMIGE – Facultad de Agronomía– FCEN, Montevideo.
- Iriondo, M. and Krohling, D.** 2004. The parent material as the dominant factor in Holocene pedogenesis in the Uruguay River Basin. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21 (1): 175-184.
- Ortiz, A.** 2002. Estudio sobre el miembro San Bautista de la Fm Raigón; Actas II Jornadas Uruguayas del Cenozoico: 69-74
- Ortiz, A. y Maldonado, S.** 2005. Posibilidad de Vertisoles sobre rocas básicas. (Establecimiento "Las Palmas" departamento de Florida.)
- Ortiz, A.; Bossi, J.; Perea, D. y Ubilla, M.** 2006. El Ensenadense en el Uruguay. Propuesta paleoclimática. Actas III Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología: 11-16
- Ponce De León, J.** 1981. Caracterización de un Vertisol de la unidad "La Carolina". Tesis de grado Facultad de Agronomía.
- Ponce De León, J. y Kaplan, A.** 1989. Estudio de un Vertisol de la Unidad La Carolina. Boletín de investigación N° 22. Facultad de Agronomía.
- Prandi, R.** 1984. La Naturaleza mineralógica de la fracción arcilla de la fm. Libertad en el Depto. de Canelones; Tesis de grado Facultad de Agronomía.
- Simpson, E. y Pérez, G.** 1984. Caracterización de un vertisol de la unidad "La Carolina". Efecto del uso en las propiedades físicas. Tesis de grado Facultad de Agronomía.