

SUELOS LOÉSSICOS INFLUENCIADOS POR DEPÓSITOS DE CONCHILLA PLEISTOCENOS DE LA FORMACIÓN PASCUA, NORESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES, ARGENTINA

*Perla A. IMBELLONE**, *Jorge E. GIMÉNEZ*, *María L. MORMENEO* y *Matías G. CUBERES*

Instituto de Geomorfología y Suelos, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 3 N° 584, B1902CIX La Plata, Argentina. micromorfologia@igs.edu.ar

Resumen: En el litoral de la provincia de Buenos Aires se encuentran varias unidades litoestratigráficas cuaternarias carbonáticas vinculadas a intrusiones marinas. En la Formación Las Escobas (Holoceno) se desarrollan suelos calcáreos litogénicos que han sido objeto de estudios taxonómicos, mineralógicos y micromorfológicos. La unidad marina más antigua es la Formación Pascua (Pleistoceno medio a superior) intercalada en la parte superior de sedimentos loésicos de la Formación Pampiano y constituida por sedimentos arenosos, cuya parte superior posee alta concentración de valvas de moluscos fuertemente cementadas con carbonato de calcio, constituyendo una coquina. Los suelos actuales, de los cuales hay escasa información y son motivo de esta presentación, se desarrollan principalmente en los sedimentos suprayacentes de la Formación Pampiano y están afectados por procesos de carbonatación, argiluviación y vertisolización. Los objetivos de esta contribución son: a) analizar las propiedades de los suelos desarrollados en sedimentos loésicos que cubren a la Formación Pascua, y b) estimar la influencia de los depósitos carbonáticos de esta formación en la génesis de los suelos. Se estudiaron cinco pedones (cuatro Molisoles y un Vertisol) en los partidos de La Plata, Magdalena y Punta Indio (provincia de Buenos Aires), en los cuales los depósitos carbonáticos tienen influencia en los horizontes inferiores de los suelos. Los pedones se desarrollan en sucesiones estratigráficas donde en la parte inferior se encuentra la Formación Pascua y donde los procesos de pedogénesis afectan a veces el techo de la misma. Es decir, que en algunos suelos hay un ciclo pedológico completo (horizontes A, B y C) desarrollado en materiales loésicos y en otros casos, parte del ciclo pedológico (*solum*: horizontes A y B) se desarrolla en el loess y parte en la coquina (horizontes C). Todos los suelos poseen evolución calcárea, con horizontes enriquecidos con carbonato de calcio y/o horizontes cálcicos y/o horizontes petrocálcicos (calcreta). Los horizontes enriquecidos en carbonato de calcio y los horizontes cálcicos están desarrollados en los depósitos loésicos, mientras que el horizonte petrocálcico se desarrolla en la parte superior de la coquina, por alteración epigénica de la misma, y cuyo contacto con el depósito loésico suprayacente es neto (espesor <2 cm) y de forma plana u ondulada. Los horizontes petrocálcicos constituyen una calcreta pedogénica de clima húmedo, compacta, sin estructura (masiva) o laminar, de menos de 10 cm de espesor. El origen del carbonato pedogénico puede atribuirse a varios mecanismos: a) disolución de carbonatos en la parte superior del perfil, translocación descendente y precipitación; b) ascenso capilar y evaporación de agua carbonatada acumulada en la parte superior de capas compactas, casi impermeables; c) disolución y reprecipitación *in situ* de los carbonatos de la coquina y d) precipitación biogénica debida a la acción de bacterias, hongos y raíces, como proceso complementario. El proceso de carbonatación sería de origen mixto: a) por

reorganización de la roca basal y b) por translocación en clima húmedo; en ambos casos el carbonato pedogenético tendría origen abiótico con participación biótica. Predomina la cristalización y recristalización, ya sea por disolución de depósitos preexistentes o por soluciones carbonatadas de desplazamiento vertical y lateral, interviniendo asimismo la biomineralización en estructuras orgánicas.

Palabras clave: suelos calcáreos, carbonato de calcio pedogénico, calcreta, litoral de la provincia de Buenos Aires.

EXTENDED ABSTRACT

Loessoid soils influenced by Pleistocene shell deposits of the Pascua Formation, northeastern Buenos Aires province, Argentina

In the littoral area of Buenos Aires province two carbonate Quaternary lithostratigraphic units linked to marine transgressions are found. In the most recent unit (Las Escobas Formation, Holocene) lithogenic calcareous soils (Calciudolls and Rendolls) are developed, which have been studied in their taxonomic, mineralogical and micromorphologic aspects (Vargas Gil *et al.*, 1972; Sánchez, 1976; Imbellone, 1996; Imbellone and Giménez, 1997; 1998). Conversely, little information on the soils associated to the oldest unit (Pascua Formation, middle to upper Pleistocene) is available. This unit is interbedded in the upper part of the loessoid sediments of the Pampiano Formation, consisting of sandy sediments with high amounts of mollusk shells strongly cemented with calcium carbonate forming a coquina (Fidalgo *et al.*, 1973). These deposits are overlain by sediments of the Pampiano Formation, over 2 m in thickness, where Mollisols and Vertisols have been affected by calcification, clay illuviation and vertisolization processes. The objectives of this article are: a) to analyze the properties of the soils developed in loessic sediments overlying the Pascua Formation, and b) to estimate the influence of the carbonate deposits of this formation in the soil genesis.

Five pedons (four Mollisols and one Vertisol) located in the municipalities of La Plata, Magdalena and Punta Indio (Buenos Aires province, Argentina, Fig. 1) were studied. The soils have developed in an upland plain adjacent to coastal plains. The climate is temperate-humid, with a mean annual rainfall of 1040 mm, fairly well distributed; mean annual temperature is 16.2 °C (La Plata city, latitude 34° 55' S, longitude 57° 56' W, altitude 15 m a.s.l.).

The monthly mean water balance shows a small deficit (7 mm) in summer and a substantial surplus (240 mm) between autumn and spring. The soil moisture regime is udic and the soil temperature regime is thermic. According to the classification of Thornthwaite (1948) the climate of the area is B1 B'2 r a'. Native vegetation is dominated by grasslands, largely modified by agriculture and grazing.

The studied soils are polygenetic due to the geomorphologic evolution of the area. The sedimentary deposits include: a) transgressive deposits of the Querandinense ingression (humid climate) at the base; b) Postquerandinense eolian deposits (dry climate) and c) Postplatense deposits (dry climate) in the upper part. Pedons 2, 3, 4 and 5 have developed in loessial sediments. Unlike other carbonatic soils of the coastal plains, they are practically devoid of primary carbonate. On the other hand, Pedon 1 would have developed in a mixed deposit: an upper soil including shell fragments (Holocene), overlying a calcrete formed in a Pleistocene loessial deposit (Fig. 2, Table 1).

The presence of pedogenic carbonate is revealed by macromorphological features such as pseudomycelia, soft powdery masses, some concretions and diffuse accumulations in root pores in the upper part of the solum, whereas the horizons overlying the rock contain lithogenic calcareous pebbles and shell fragments, as well as some pedogenic carbonates (soft powdery masses).

Pedons 2, 3, 4 and 5 have a similar distribution of CaCO₃ equivalent in depth. The carbonate is absent or has <1% in the upper horizons, it increases in the middle horizons and may reach 70% at the soil base or 80% in the coquina.

The morphological and chemical characteristics of the calcareous accumulations allow the following horizons to be differentiated: a) calcium carbonate-enriched horizons (all pedons); b) calcic horizons (pedons 4 and 5) and c) petrocalcic horizons (pedons 1, 3 and 4). All of them exhibit calcareous

reorganization. The former two are developed in the loessial deposits, whereas the latter are developed in the upper part of the coquina by epigenic alteration. Its contact with the overlying loessial sediments is sharp (<2 cm in thickness), with level or undulating shape, forming a compact, structureless (massive) or platy calcrete, less than 10 cm thick.

The carbonate-enriched and calcic horizons have randomly distributed pedogenic acicular calcite (Fig. 3); the former with <15% and the latter with $\geq 15\%$ of CaCO_3 equivalent. The petrocalcic horizons are massive or platy with ordered tabular calcite and rhombohedra and scalenohedra in rock holes, where CaCO_3 equivalent can be as high as 60-70%.

Grain-size distribution in pedons 2, 3 and 4 is similar and typical of the soils developed across the Undulating Pampa. The histograms show a well-defined mode in the coarse silt fraction (62-32 μm , 4-5 ϕ) ranging from 24.01 to 25.34% in the eluvial horizons and from 14.17 to 22.42% in the illuvial horizons (Fig. 4). There is also a high amount of <1 μm clay (below 10 ϕ), with 19.32-20.18% in the eluvial horizons and 22.90-52.17% in the illuvial horizons. The sand fraction is much lower, with fine and very fine sand as the dominant subfractions. The grain-size distribution of pedon 1 is almost uniform up to the loess deposit because illuvial horizons are absent.

The mineralogy of the clay fraction in the loessial portion of Vertic Argiudolls (pedons 2 and 3) is mainly illitic, with well-defined reflections of this mineral and subordinate amounts of expandable minerals and kaolinite (Fig. 5). In addition to this general trend, a marked increase of expandable clays in B horizons was observed with respect to the A horizons. This would suggest, together with grain-size variations in the coarse fraction, a sedimentary discontinuity; thus, the soils of the area would have formed in two loess mantles with different grain-size composition and clay mineralogy.

Micromorphological features revealed through optical microscopy include micritic and acicular calcite coatings and micritic nodular concentrations. SEM reveals recrystallization and dissolution morphologies in calcite crystals, which sometimes are found in the same horizon (Figs. 5, 6, 7).

The pedons exhibit different crystallization morphologies; in the calcrete the cement has more or less equidimensional "rice grain"-shaped crystals and sparry and microsparitic calcite, whereas in

the loessic horizons acicular calcite with variable morphology is mainly found.

In the studied soils, acicular calcite presents different morphologies which may coexist in the same horizon: a) masses of disarranged crystals, 10-50 μm long and 1 μm wide; b) needles with serrated irregular borders, c) complex morphologies of needles with serrated borders and irregular growths on the needles and, d) rhombohedral calcite *en échelon*. The calcrete in the petrocalcic horizons may present a laminar zone with tabular and rhombohedral calcite.

The origin of pedogenic carbonate can be ascribed to various mechanisms, with different degree of influence: a) dissolution of carbonates in the upper part of the profile, downward translocation and precipitation; b) capillary rise and evaporation of carbonate water accumulated on the top of compact, almost impervious layers, c) *in situ* dissolution and reprecipitation of the coquina carbonates (petrocalcic horizons) and, d) biogenic precipitation due to the action of bacteria, fungi and plant roots, as a complementary process.

The origin of the calcification process in the studied soils would be a mixed reorganization of the base rock and translocation under humid climate. In both cases the pedogenic carbonate would have had an abiotic origin with some biotic participation. Crystallization and recrystallization are dominant, either through dissolution of pre-existing deposits or through carbonate solutions moving vertically and laterally; biomineralization in organic structures has also an influence. In this way, the petrocalcic horizon is a pedogenic calcrete of humid climate.

Keywords: calcareous soils, pedogenic calcium carbonate, calcrete, littoral Buenos Aires province.

INTRODUCCIÓN

Los aspectos geomorfológicos, estratigráficos, sedimentológicos y tafonómicos del litoral de la provincia de Buenos Aires han sido muy estudiados desde los tiempos de Ameghino (1880-1881). Contrariamente a los aspectos pedológicos, entre los que cabe mencionar a Cappannini (1949). En el litoral de la provincia de Buenos Aires se encuentran dos unidades litoestratigráficas cuaternarias carbonáticas vinculadas a las intrusiones marinas. La más moderna es la Formación Las Escobas (Holoceno), en la cual

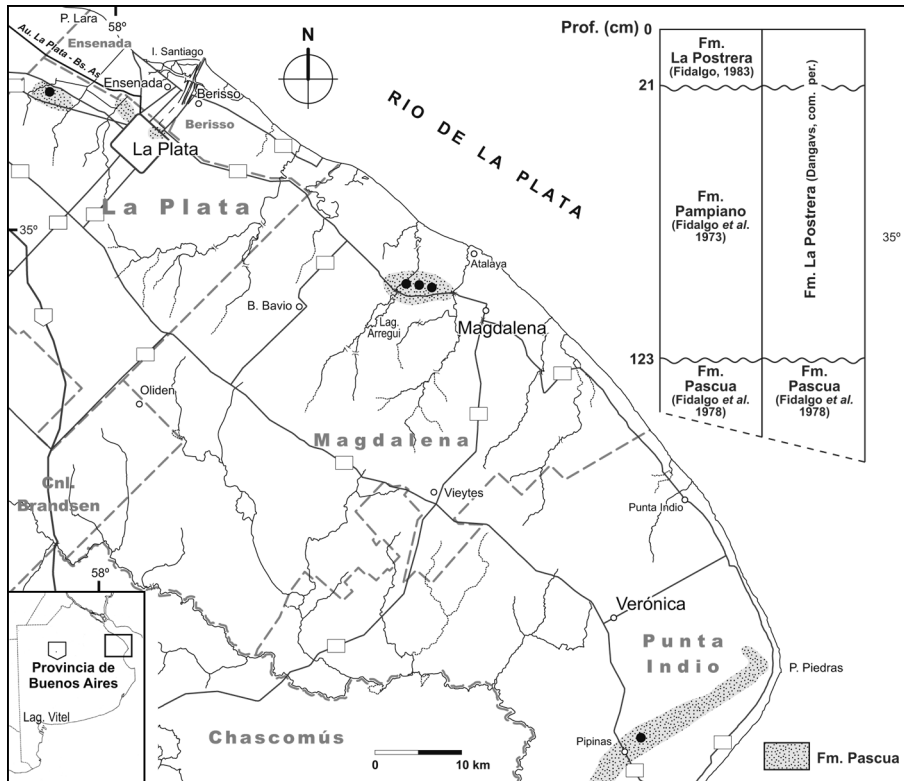


Figura 1. Mapa de la zona de estudio con la ubicación de los pedones analizados, incluyendo la columna estratigráfica en la que se desarrollan los suelos. En gris distribución de la Formación Pascua; basada parcialmente en Schnack *et al.* (2005) y Fucks *et al.* (2010).

Figure 1. Map of the study area with the studied pedons including the stratigraphic column hosting the analyzed soils. Distribution (in gray) of the Pascua Formation; partially based on Schnack *et al.* (2005) and Fucks *et al.* (2010).

se desarrollan Calciudoles y Haprendoles calcáreos litogénicos, acerca de los cuales hay descripciones, consideraciones taxonómicas e investigaciones específicas de la mineralogía, micromorfología y de la evolución del proceso de carbonatación (Vargas Gil *et al.*, 1972; Sánchez, 1976; Imbellone, 1996; Imbellone y Giménez, 1997; 1998).

La unidad marina más antigua es la Formación Pascua constituida por una coquina. En las zonas donde la literatura geológica (Fidalgo *et al.*, 1973; Schnack *et al.*, 2005) registra la presencia de esta formación (Fig. 1) se encuentran suelos formados en los depósitos loésicos de la Formación Pampiano, cuyos procesos pedogenéticos han sido poco estudiados. En particular no se menciona la influencia de la coquina en los procesos de carbonatación de los suelos. En las cartas de suelos de la zona sólo se menciona la presencia de suelos con gravilla y concreciones calcáreas en la base de los suelos (INTA, 1989). Los mapas mencionados solamente describen unidades cartográficas y taxonómicas sin ahondar en aspectos genéticos específicos.

La Formación Pascua, descrita por Fidalgo *et al.* (1973), se intercala en la parte superior de los sedimentos loessoides de la Formación Pampiano de origen continental, acuñándose desde la costa hacia el continente. Esta unidad, que no posee distribución

continua a lo largo del litoral bonaerense, está constituida por sedimentos arenosos, cuya parte superior presenta alta concentración de valvas de moluscos fuertemente cementadas con CaCO_3 , constituyendo una coquina. Suprayacen sedimentos loésicos de la Formación Pampiano con un espesor mayor a 2 m (Fidalgo *et al.*, 1973), donde se desarrollan total o parcialmente los suelos estudiados en este trabajo.

Los pedones estudiados en este trabajo se desarrollan en sucesiones estratigráficas donde en la parte inferior se encuentra la Formación Pascua y donde los procesos de pedogénesis afectan a veces el techo de la misma. Es decir que en algunos suelos habría un ciclo pedológico completo (horizontes A, B y C) desarrollado en materiales loésicos y en otros casos, parte del ciclo pedológico se desarrolla en el loess (*solum*: horizontes A y B) y parte en la coquina (horizontes C). Dos conceptos clásicos de la pedología pueden aplicarse a los suelos estudiados: 1) el horizonte C de los suelos es una porción de la columna estratigráfica que es a la vez un horizonte de suelo y un sedimento o saprolito; 2) en los suelos desarrollados en distintos materiales originarios la pedogénesis de un ciclo pedológico puede alcanzar a uno o a varios materiales originarios, hecho que se manifiesta en la nomenclatura de los horizontes (Birkeland, 1984; Buol *et al.*, 1989).

Los objetivos de esta contribución son: a) analizar las propiedades de los suelos desarrollados en sedimentos loésicos que cubren a la Formación Pascua, y b) estimar la influencia de los depósitos carbonáticos de esta formación en la génesis de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se caracterizaron cinco suelos ubicados en los partidos de La Plata (pedón 1), Magdalena (pedones 2, 3 y 4) y Punta Indio (pedón 5), provincia de Buenos Aires (Fig. 1). El pedón 1 se encuentra en un cordón conchil entre los arroyos Carnaval y Martín. Los demás suelos se hallan en la llanura loésica, cerca del límite con la llanura costera del Río de la Plata y la zona litoral norte de la Bahía de Samborombón. Los pedones 2, 3 y 4 se encuentran en una pendiente hacia el arroyo Espinillo, los pedones 2 y 4 en la parte alta y el 3 en la parte baja. El pedón 5 se ubica en la parte alta de una loma alargada.

Se describieron, muestrearon y analizaron todos los horizontes de suelos hasta el material calcáreo parcial o totalmente consolidado según métodos convencionales (Soil Survey Division Staff, 1993; Schoeneberger *et al.*, 2000). Se clasificaron los suelos según Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2010) por ser el sistema de uso oficial en la Argentina y según el Sistema WRB (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007), por haber sido adoptado por la Unión Internacional de la Ciencia del Suelo (IUSS) como sistema de correlación mundial de suelos. El análisis textural se realizó sobre muestra total (“tierra fina seca al aire”) (National Soil Survey Center, 1996) previa eliminación de materia orgánica y carbonatos cuando fue necesario, por el método de la pipeta en escala sedimentológica a 1Ø, elegida para analizar más detalladamente las características de los materiales. No obstante, por tratarse de un trabajo pedológico los datos se presentan en escala pedológica con el límite de arcilla en 2 µm y las clases texturales según el sistema USDA. El contenido de CaCO₃ se estimó por reacción con ácido clorhídrico al 10% en el campo y se determinó por el método gravimétrico cuando el material es fuertemente calcáreo (efervescencia fuerte, 10-25% de CaCO₃ en la matriz) (FAO, 2009) y por neutralización ácida para contenidos menores (moderadamente calcáreo: 2-10%, ligeramente calcáreo: >0-2%) (Allison y Moodie, 1965). La mineralogía de arcillas se determinó mediante difracción de rayos X en submuestras naturales,

glicoladas y calcinadas saturadas con magnesio y las especies minerales se semicuantificaron por áreas en las muestras glicoladas según el método de Biscaye (1965). En las calcretas se analizaron muestras de polvo y muestras orientadas, cuyos difractogramas no se incluyen en este trabajo.

Las observaciones de los rasgos carbonáticos se realizaron a mesoescala en el perfil del suelo y a microescala por microscopía óptica en secciones delgadas y microscopía electrónica de barrido en fracturas frescas de fragmentos de agregados, donde el color claro de las masas pulverulentas hacía suponer la presencia de calcita secundaria.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Geomorfología

La evolución geomorfológica de la zona litoral noreste de la provincia de Buenos Aires registra variaciones en los depósitos sedimentarios relacionados a los cambios climáticos acaecidos durante los últimos 125 ka AP (Violante *et al.*, 2001).

Se documentan tres transgresiones según el esquema de Tricart (1973): Querandinense (M4), Platense (M2) y Dunkerquiense (Mob) y sus respectivas regresiones: Postquerandinense (E3), Postplatense (E1) y Actual (Moa/Ao). Durante las transgresiones el clima habría sido más seco y se habrían formado depósitos y redepósitos eólicos con características loésicas. Según este autor, el Querandinense es la primera transgresión del Postpampiano y en la zona de Pipinas y Magdalena se encuentra como una coquina formando bancos bien consolidados. Esta transgresión habría penetrado hasta los 10 m s.n.m., altitud que coincide con la del nivel del mar durante el interglacial Mindel-Riss de acuerdo con la estratigrafía (Tricart, 1973) basada en las oscilaciones glacioeustáticas del nivel del mar.

El Platense se diferencia del Querandinense en extensión y en sus depósitos de distinta naturaleza, entre los que se encuentran la facies litoral constituida por depósitos de conchilla con distintas proporciones de arena. Las alturas del antiguo litoral platense serían más bajas (4-6 m s.n.m.), correspondientes al máximo transgresivo y, según la cronología glacial, correspondería al interglacial Riss-Wurm. El Dunkerquiense se identifica sólo en una zona muy próxima a la costa actual por un resalto de 1-1,5 m. Para Tricart (1973) el Pampiano habría finalizado “ya

sea al final del Mindel o durante la primera parte del Interglacial Mindel-Riss, cuya duración habría sido larga”, incluyendo al Querandinense, Platense, Dunkerquiense y Actual. Es decir que la estratigrafía de Tricart no coincide con la de otros autores como Frenguelli (1957) y Cappannini (1952) para quienes todo el Postpampiano comprende solamente el Holoceno.

También Fidalgo *et al.* (1973) registran tres ingresiones marinas. La más antigua está representada por la Formación Pascua, a la cual se le asigna una antigüedad que oscila entre Pleistoceno medio y superior y que correspondería a la transgresión Querandinense de Tricart. El depósito sedimentario dio origen a la coquina de la Formación Pascua, la cual se encuentra enterrada por sedimentos eólicos, en los que evolucionan los suelos actuales de génesis netamente continental. La segunda transgresión corresponde a los sedimentos de la Formación Río Salado correlacionada con la Edad Mamífero Lujanense. La tercera está representada por la Formación Las Escobas asignada al Reciente.

Dataciones realizadas por el método de ^{14}C asignan a la Formación Pascua las siguientes edades: >40.000 a AP en Pipinas (Colado *et al.*, 1995) y 30.190 ± 730 a AP en Bahía de Samborombón (Cortelezzi, 1993). Según el método U-Th se asignó una edad de $93,5 \pm 3,5$ ka AP en Faro de Claromecó (Isla *et al.*, 2000).

El área de estudio se halla surcada por varios arroyos, que en su mayor parte pertenecen a la vertiente del Río de la Plata y en el sector sur a la cuenca del río Samborombón. En estos arroyos la ingresión pleistocena penetró más profundamente y en algunos se encuentran depósitos calcáreos como en los arroyos Carnaval-Martín, partido de La Plata (pedón 1) y en el arroyo Espinillo (pedones 2, 3 y 4, partido de Magdalena). Existen diferencias de geoformas entre ambas cuencas. En la del Río de la Plata la topografía es plana a suavemente ondulada con pendientes del 0,5-2%, y geoformas definidas: interfluvios, pendientes y planicies de inundación que representan las manifestaciones más meridionales de la Pampa Ondulada. En cambio, la vertiente del río Samborombón posee relieve más plano, con ambientes transicionales a la Pampa Deprimida, donde se hace más difícil diferenciar los tres ambientes antes mencionados. Sin embargo, en las cercanías del río Samborombón y afluentes, y bordeando la llanura costera vecina, se presentan

lomas subcirculares y elongadas, en algunas de las cuales se encuentran depósitos de conchilla pleistocenos, como el pedón 5.

Clima

En el área de la ciudad La Plata la precipitación media anual es de 1040 mm, con una distribución estacional de lluvias bastante regular en la mayor parte del año (verano y otoño: 27,8%, primavera: 25,6% y una cierta disminución en invierno: 18,8%). El mes más lluvioso es marzo (111 mm) y el menos lluvioso junio (63 mm). La temperatura media anual es de 16,2 °C, con medias de verano de 22,0 °C y de invierno de 10,4 °C. Las temperaturas máxima y mínima absolutas han sido 43 °C y -5 °C. Estos datos provienen de la Estación Climatológica La Plata, Observatorio Astronómico, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP (período 1909-2005; latitud 34° 55' S, longitud 57° 56' O; altitud 15 m s.n.m.). Una serie histórica más corta (1951-1960) del Servicio Meteorológico Nacional indica para la localidad de Punta Indio (Fig. 1) una precipitación media anual de 1026 mm y una temperatura media anual de 15,6 °C.

El balance hídrico medio mensual (Thorntwaite y Mather, 1957) muestra un pequeño déficit de agua en el suelo en verano (alrededor de 7 mm) y un exceso importante (240 mm) entre abril y noviembre. Estos datos permitieron determinar un régimen zonal de humedad *údic* para los suelos mejor drenados de la región. Mediante la estimación de la temperatura media anual, de verano y de invierno del suelo a 50 cm (17,2; 21,4 y 11,0 °C, respectivamente) a partir de las respectivas temperaturas del aire, se determinó para el área un régimen de temperatura del suelo *térmico* (Soil Survey Staff, 1999).

Según la clasificación de Thorntwaite (1948) le corresponde a la zona el clima *B1 B'2 r a'* (húmedo, mesotérmico, con nula o pequeña deficiencia de agua y baja concentración térmica estival).

Vegetación

La vegetación natural dominante en las zonas de interfluvios es el pastizal pampeano, comunidad también denominada “estepa gramínea climax” (Cabrera y Zardini, 1993) o “flechillar típico” (Vervoost, 1967). Sin embargo, las actividades agropecuarias desarrolladas durante alrededor de un siglo

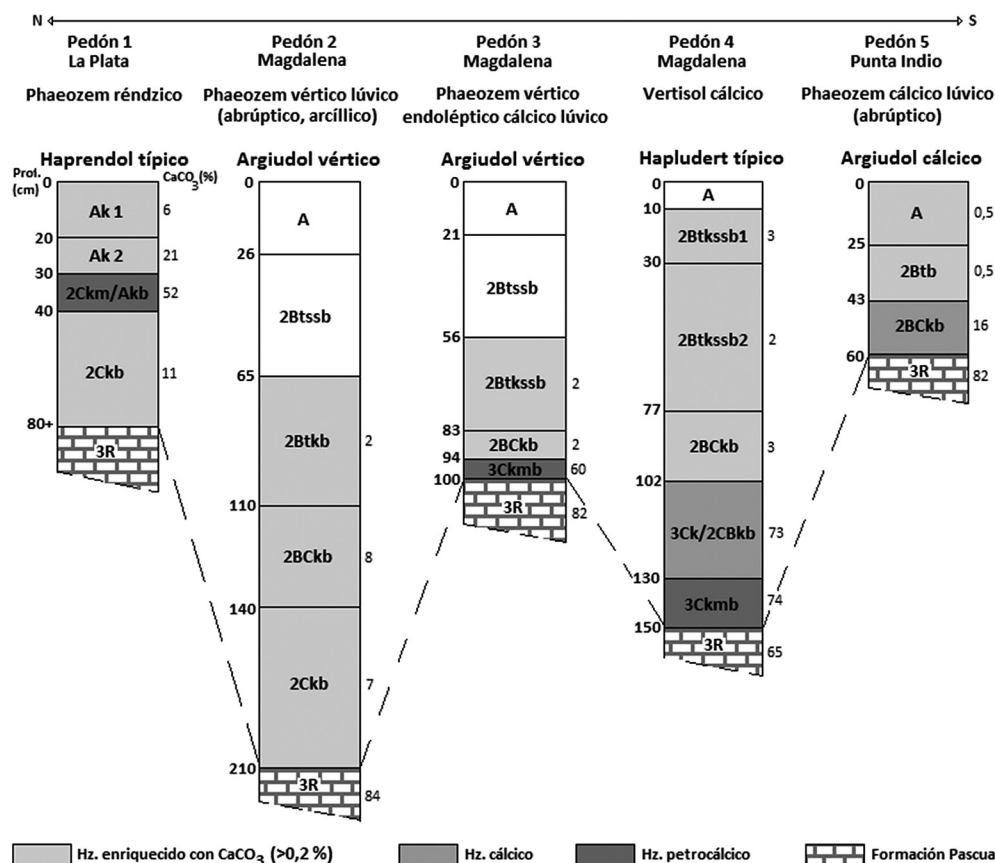


Figura 2. Diagramas de los perfiles mostrando la presencia de: a) horizontes enriquecidos en carbonato de calcio (pedón 1: Ak1, Ak2, 2Ckb; pedón 2: 2Btkb, 2BCkb, 2Ckb; pedón 3: 2Btkssb, 2BCkb; pedón 4: 2Btkssb1, 2Btkssb2, 2BCkb); b) horizontes cálcicos (pedón 4: 3Ck/2CBkb; pedón 5: 2BCkb); c) horizontes petrocálcicos (pedón 1: 2Ckm/Akb, pedón 3: 3Ckmb; pedón 4: 3Ckmb). **Figure 2.** Schematic diagrams of profiles showing: a) calcium carbonate-enriched horizons (pedon 1: Ak1, Ak2, 2Ckb; pedon 2: 2Btkb, 2BCkb, 2Ckb; pedon 3: 2Btkssb, 2BCkb; pedon 4: 2Btkssb1, 2Btkssb2, 2BCkb). b) calcic horizons (pedon 4: 3Ck/2CBkb; pedon 5: 2BCkb). c) petrocalcic horizons (pedon 1: 2Ckm/Akb; pedon 3: 3Ckmb; pedon 4: 3Ckmb).

han modificado profundamente las características florísticas y estructurales del pastizal original. Entre las especies originariamente dominantes se pueden mencionar a *Stipa neesiana*, *Piptochaetium montevidense* y *Bothriochloa laguroides*. Estas han sido reemplazadas por forrajeras exóticas como los géneros *Lolium*, *Festuca*, *Phalaris*, *Dactylis* y *Trifolium* (León *et al.*, 1984). Otras especies consideradas malezas comunes en el área son *Cynara cardunculus*, *Carduus acanthoides*, *Baccharis sp.* Se encuentran también especies arbóreas nativas como el tala (*Celtis tala*) en forma dispersa o géneros exóticos como *Eucalyptus* o *Casuarina*.

RESULTADOS

Propiedades de los Suelos

Los materiales originarios y las características

de los suelos estudiados se ajustan al esquema geomorfológico de Tricart (1973) y reafirman las consideraciones de Vargas Gil *et al.* (1972). Los suelos son poligenéticos como resultado de la evolución geomorfológica del ambiente litoral y los procesos geomórficos acaecidos quedan manifestados en los suelos y señalados mediante la nomenclatura de sus horizontes.

La parte superior de los pedones 2, 3, 4 y 5 (Fig. 2, Tabla 1) se desarrolló en sedimentos loésicos que, a diferencia de otros suelos carbonáticos de la zona litoral bonaerense, no poseen carbonato de calcio mecánicamente heredado de rocas calcáreas (carbonato primario, geogénico o litogénico; Rabenhorst y Wilding, 1986; Imbellone y Giménez, 1998).

Un caso singular es el pedón 1 (Tabla 1), que difiere del conjunto anterior. El depósito más moderno, que constituye los horizontes A de este pedón, posee

Horizonte	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural	pH (pasta)	C.O. (%)	CaCO ₃ (%)
Pedón 1. Haprendol típico (TS), Phaeozem réndzico (WRB). Partido de La Plata. 5,5 m s.n.m.								
Ak1	0-20	17,2	52,2	30,6	FaL	8,4	4,0	6,8
Ak2	20-30	21,2	46,7	32,1	Fa	8,1	2,2	21,3
2Ckm/Akb	30-40	20,5	48,3	31,2	Fa	8,3	1,2	52,1
2Ckb	40-80	45,7	49,1	5,2	F	8,3	0,1	11,2
3R	80+	-	-	-	-	-	-	-
Pedón 2. Argiudol vértico (TS), Phaeozem vértico lúvico (abruptico, arcílico) (WRB) Partido de Magdalena. 9,0 m s.n.m.								
A	0-26	15,0	62,4	22,5	FL	6,8	1,7	0,0
2Btssb	26-65	8,9	35,6	55,5	a	6,8	0,6	0,0
2Btkb	65-110	10,0	47,9	42,1	a	7,4	0,2	2,1
2BCkb	110-140	12,3	59,5	28,2	FaL	7,9	0,3	7,8
2Ckb	140-210	15,3	57,6	27,1	FaL	7,5	0,1	6,5
3R	210+							84,0
Pedón 3. Argiudol vértico (TS), Phaeozem vértico endoléptico cálcico lúvico (WRB) Partido de Magdalena. 6,5 m s.n.m.								
A	0-21	13,7	61,9	24,4	FaL	6,6	3,9	0,0
2Btssb	21-56	10,7	51,5	37,8	aL	6,8	1,2	0,0
2Btkssb	56-83	7,9	44,2	47,3	aL	8,0	0,5	2,1
2BCkb	83-94	8,5	46,3	45,2	aL	7,8	0,4	2,4
3Ckmb	94-100							60,0
3R	100+							82,0
Pedón 4. Hapludert típico (TS), Vertisol cálcico (WRB). Partido de Magdalena. 9,0 m s.n.m.								
A	0-10	12,7	55,8	31,5	FaL	7,0	2,5	0,0
2Btkssb1	10-30	7,2	40,1	52,7	a	7,9	0,6	2,9
2Btkssb2	30-77	7,0	40,6	52,4	a	7,9	0,2	2,4
2BCkb	77-102	8,2	45,1	46,7	aL	7,7	0,1	2,6
3Ck/2CBkb	102-130					8,0	0,1	73,1
3Ckmb	130-150							74,3
3R	150-200+							65,3
Pedón 5. Argiudol cálcico (TS), Phaeozem cálcico lúvico (abruptico) (WRB) Partido de Punta Indio. 10,0 m s.n.m.								
A	0-25	9,0	54,5	36,4	FaL - aL	6,1	3,5	0,5
2Btb	25-43	7,0	35,3	57,7	a	5,7	1,7	0,5
2BCkb	43-60	8,0	47,0	44,9	aL - a	6,7	0,2	16,4
3R	60+							82,0

Ref.: C.O.: carbono orgánico. Clases texturales: a: arcilloso; L: limoso; F: franco

Tabla 1. Propiedades morfológicas y fisicoquímicas seleccionadas de los suelos. C.O.: carbono orgánico. Clases texturales: a: arcilloso; L: limoso; F: franco.

Table 1. Selected morphological and physicochemical properties of the soils. C.O.: organic carbon. Textural classes: a: clay; L: silt; F: loam.

fragmentos de desagregación y alteración de la calcreta y restos de conchilla triturados; por debajo se encuentra una calcreta laminar que constituye un horizonte petrocálcico (2Ckm/Akb) intercalada en un depósito loésico (2Ckb). A partir de los

80 cm el depósito calcáreo está tan fuertemente carbonatado que no se puede atravesar con pala y podría ser parte de la Formación Pascua, ya que los depósitos de la Formación Las Escobas no suelen presentar tal dureza. Este perfil fue incluido porque

posee en el techo del depósito loésico una calcreta semejante a las que se encuentra en la parte superior de la Formación Pascua en los demás perfiles analizados, aunque el depósito superficial parece ser retrabajado y, a diferencia de aquéllos, el suelo está poco desarrollado. Sería el caso de un suelo que ha evolucionado en un depósito mixto: en la base, y cercana a la superficie, una calcreta formada en una interstratificación de la Formación Pascua (?) en el depósito loésico pleistoceno y un suelo superficial formado en un depósito holoceno, que podría estar constituido por una mezcla de sedimentos de la Formación La Postrera y la facies terminal de la Formación Las Escobas. Posiblemente este suelo se ha desarrollado en sectores donde la Formación Pascua se acuña hacia el continente y casi aflora, como se observa en las cercanías de la localidad de Magdalena, aunque más estudios son necesarios sobre este punto.

Los suelos que sobreyacen a los depósitos calcáreos de origen marino que se encuentran a profundidades variables, corresponden a los órdenes Molisol y Vertisol (Fig. 2). Los pedones 1, 2, 3 y 5 se clasificaron como Molisoles (Taxonomía de Suelos) y Phaeozems (WRB) por poseer epipedón de diagnóstico *mólico*. El pedón 4 se clasificó como Vertisol tanto en Taxonomía de Suelos (Gran Grupo Hapludert) como en WRB por mostrar evidencias de expansión-contracción, tales como superficies de deslizamiento y superar el mínimo requerido de arcilla (30%) desde la superficie. Los pedones 2 y 3 también poseen características expansivas pero, por no alcanzar el contenido mínimo de arcilla, se los excluye de los Vertisoles y aquellas características se indican con el adjetivo *vértico* a nivel de subgrupo en Taxonomía de Suelos o en el segundo nivel de WRB. Los horizontes Bt, presentes en todos los pedones estudiados excepto el 1, reúnen los requisitos de horizonte de diagnóstico *argílico* en cuanto a espesor y evidencias de iluviación de arcilla. No se consideró el incremento de arcilla respecto a los horizontes eluviales ya que Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2010) especifica que esa exigencia no es aplicable a suelos con discontinuidad litológica entre los horizontes eluviales e iluviales, como ocurre en los suelos estudiados.

Los suelos bien desarrollados (pedones 2, 3, 4 y 5) poseen un ciclo pedológico incompleto que está enterrado (en el concepto genético) por un depósito sedimentario de escaso espesor (10-26 cm),

en el que se desarrolla el horizonte A, es decir que son suelos enterrados cerca de la superficie. Los depósitos calcáreos de origen marino se encuentran a profundidades variables, en los que apoyan horizontes C o BC (pedones 2 y 5) o constituyen horizontes C petrocálcicos formados en la parte superior de la coquina (pedones 3 y 4) (Fig. 2). Hay casos en que el material loésico apoya en la coquina con un límite claro (espesor del límite entre 2 y 5 cm) entre ambos depósitos (pedones 2 y 5) y en otros casos entre el depósito loésico y la coquina hay una zona de alteración física y química de la coquina que da lugar a la formación de horizontes petrocálcicos (pedones 3 y 4). El material carbonático, masivo y fuerte o moderadamente cementado, se encuentra entre los 0,60 y 2,10 m de profundidad en los pedones 2, 3, 4 y 5; en cambio, en el pedón 1 hay intercalaciones lentiformes y cementadas en el depósito loésico, de espesores entre 2 y 10 cm a partir de los 30 cm y hasta aproximadamente 80 cm de profundidad; no se profundizó la observación por la dificultad de cavar debido a la dureza del material (Fig. 2, Tabla 1).

Algunos suelos poseen *solums* someros (40 cm, pedón 1; 60 cm, pedón 5), en cambio otros son profundos (140 cm, pedón 2; 94 cm, pedón 3; 130 cm, pedón 4), semejantes a suelos de la zona donde todo el depósito sedimentario es loess y donde no se encuentra la roca carbonática en la base, ya sea porque el espesor del manto de loess es más espeso o porque la Formación Pascua no está presente, por su distribución saltuaria en la zona.

La mayoría de los suelos analizados son moderada a fuertemente evolucionados, con horizontes Bt bien expresados (30 a 90 cm de espesor), lo cual contrasta con el incipiente desarrollo de los suelos formados en los depósitos de conchilla holocenos (Imbellone, 1996; Imbellone y Giménez, 1998). En los primeros los horizontes A tienen hasta 26 cm de espesor y están bien provistos de materia orgánica (C orgánico 1,7 - 4%) con marcado decrecimiento en profundidad, como corresponde a suelos de pradera gramínea (Jenny, 1994; Imbellone *et al.*, 2010). La clase de drenaje natural de estos suelos es “moderadamente bien drenada” a “imperfectamente drenada” (Soil Survey Division Staff, 1993).

Los horizontes Bt poseen barnices arcillosos de abundancia moderada y en varios casos superficies de deslizamiento comunes; además, algunos suelos presentan escasos moteados y concreciones

ferromangáníferas en el techo de los horizontes iluviales (Tabla 1).

El proceso de carbonatación es manifiesto en todos los suelos analizados. Este es un proceso biogeoquímico regulado por el estado geoquímico del suelo que gobierna el balance entre la solubilidad del bicarbonato y la insolubilidad del carbonato de calcio (Goudie, 1983). El balance depende de la relación entre el CO_2 del suelo, el estado de humedad, la presencia de sales y otros cationes, el pH y la temperatura. Los pedones 2, 3, 4 y 5 presentan una distribución de carbonato de calcio típica de los suelos de pradera (Jenny, 1992). Así, está ausente o hay $<1\%$ en los horizontes A, donde hay mayor cantidad de CO_2 proveniente de la respiración de los organismos, abundante materia orgánica, pH más ácido y mayor humedad superficial; allí se produce lixiviación total o parcial de carbonatos que se depositan en los horizontes B, donde llegan a valores de entre 2 y 7%, mientras que en la base de los suelos son muy elevados, alcanzando 70% en la calcreta y alrededor del 80% en la coquina. La distribución de carbonatos en profundidad es semejante a la descrita en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires, donde también se encuentran Molisoles con horizontes petrocálcicos a aproximadamente 1 m de profundidad cubiertos por sedimentos eólicos (Amiotti *et al.*, 2001). Distinto es el caso del pedón 1 cuyos horizontes A poseen restos de conchilla en el depósito original y la formación de carbonato pedogénico se produciría más por reorganización *in situ* que por translocación de soluciones carbonatadas.

Los rasgos carbonáticos de la parte superior del solum consisten en concentraciones pulverulentas en la masa, pseudomicelios y escasas muñequillas de tosca, los cuales a veces son nítidamente destacables en la matriz del suelo por el color blanquecino y la morfología, como en los pedones 2 y 3, o difícilmente identificables a simple vista como en el pedón 4. En cambio, los horizontes cercanos a la roca poseen rodados calcáreos y masas o bochones de la coquina en distinto grado de alteración, concentración y expresión; forman zonas blanquecinas de distribución irregular y constituyen una zona de transición entre la coquina y el loess propiamente dicho. En esos casos, donde no se puede establecer un límite entre horizontes, se adoptó una nomenclatura que incluye dos horizontes, colocando primero el que se estima predominante, como en los pedones 1 y 4 (Fig. 2).

En el techo de la coquina se encuentra a veces una calcreta laminar, como en los pedones 1, 3 y 4.

Las características morfológicas y químicas de las acumulaciones calcáreas de los suelos estudiados permitieron diferenciar: a) horizontes enriquecidos en carbonato de calcio, b) horizontes cálcicos y c) horizontes petrocálcicos, utilizando para esta discriminación el criterio de Taxonomía de Suelos en relación al contenido de carbonato de calcio, independientemente de su espesor. Denominamos "horizontes enriquecidos en carbonato de calcio" a aquellos con carbonato pedogenético cuyo contenido no alcanza al mínimo de CaCO_3 requerido para indicarlos como horizontes de diagnóstico cálcicos (15%). Todos muestran reorganización calcárea; los dos primeros se encuentran dentro del depósito loésico; en cambio, el último se desarrolla por evolución de la roca calcárea, en la parte superior de la misma, formando una calcreta compacta, masiva o laminada, generalmente de espesor inferior a 10 cm y a veces muy fina (alrededor de 5 mm), en la zona de contacto entre el sedimento loésico y la roca organógena. Los horizontes enriquecidos en carbonato de calcio y los horizontes cálcicos poseen calcita pedogenética acicular de distribución desordenada (Fig. 3). Los horizontes petrocálcicos exhiben a veces calcita tabular ordenada, romboedros y escalenoedros de crecimiento desordenado en agujeros de la roca, y calcita "granos de arroz" en el cemento; poseen más del 15% de carbonato de calcio equivalente alcanzando valores entre 60 y 70%.

Con respecto a la fuente del CaCO_3 de los suelos estudiados, y a diferencia de otras zonas donde no hay rocas calcáreas, en esta zona existen importantes depósitos. En estos suelos, además del carbonato aportado por la roca calcárea de su base, podría haber adiciones atmosféricas y aportes de aguas carbonatadas de escurrimiento superficial y subsuperficial que contribuirían a formar carbonato pedogénico.

El factor climático más importante sería la precipitación; el exceso de agua durante aproximadamente 7 meses al año favorece el ingreso de agua al suelo como también la solubilización de carbonatos preexistentes en el suelo y la roca cercana a la superficie. Si bien el período de déficit de agua es limitado, sería suficiente para la depositación de carbonato pedogénico en el perfil del suelo y alteración de la roca con formación de una calcreta en clima húmedo.

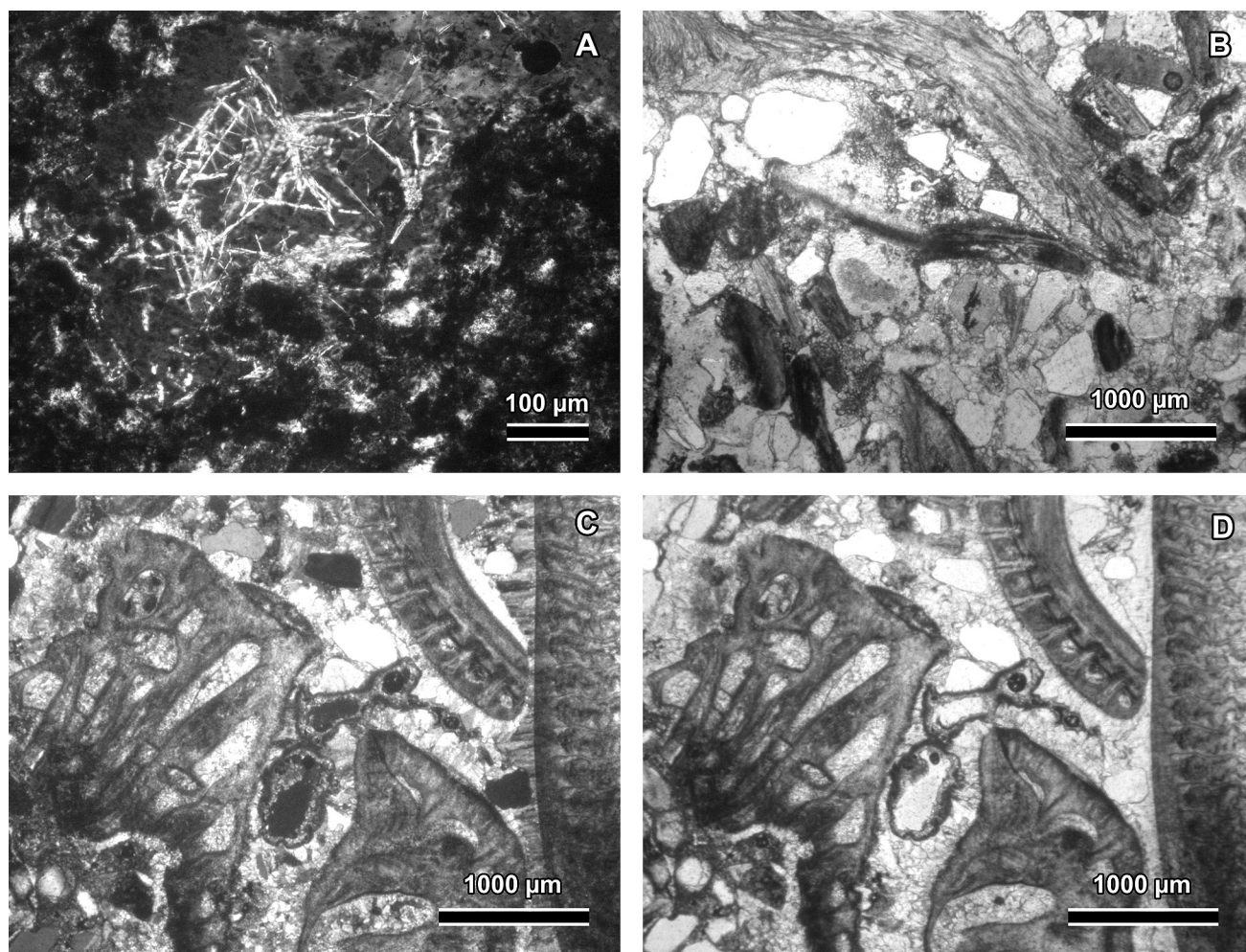


Figura 3. Pedones 3 y 4. Microscopía óptica. a) Conjunto de cristales entrecruzados aciculares de calcita en un vacío del suelo. Argiudol vértico, pedón 3, horizonte 2Btkssb. Nícoles cruzados. b) Coquina donde se observan restos de conchilla mezclados con clastos minerales y cementados por calcita. Hapludert típico, pedón 4, horizonte 3R. Sin analizador. c) Coquina donde se observan restos de bioclastos con marcadas estructuras orgánicas cementados por calcita esparítica. Argiudol vértico, pedón 3, horizonte 3R. Nícoles cruzados. d) Ídem a (c). Sin analizador.

Figure 3. Pedons 3 and 4. Optical microscopy. a) Crosslinked acicular calcite crystals in a soil void. Vertic argiudoll, pedon 3, 2Btkssb horizon. Crossed polarized light. b) Coquina showing shell fragments mixed with mineral clasts cemented by calcite. Typic hapludert, pedon 4, 3R horizon. Plane polarized light. c) Coquina showing bioclasts with conspicuous organic structures cemented by sparry calcite. Vertic argiudoll, pedon 3, 3R horizon. Crossed polarized light. d) Idem (c). Plane polarized light.

Granulometría. La distribución granulométrica interpedónica e intrapedónica de los suelos estudiados posee tendencia similar principalmente en los pedones 2, 3 y 4 (Fig. 4). Algunas diferencias en los tenores de la fracción arcilla los diferencian taxonómicamente, aunque la característica granulométrica del sedimento es la típicamente loésica de la Pampa Ondulada. Los histogramas presentan una moda bien marcada en la fracción limo grueso (entre 62 y 31 μm , 4 a 5 \emptyset) con tenores de entre 24,01 y 25,34% en los horizontes eluviales y de 14,17 y 22,42% en los iluviales. También hay una elevada concentración de arcilla menor a 1 μm

(valores menores a 10 \emptyset), con 19,32 y 20,18% en los horizontes eluviales y 22,9 y 52,17% en los iluviales (Fig. 4). La fracción arena fina es minoritaria (0,2 y 4,9 %) y las subfracciones de mayor tamaño (arena gruesa, 1000-500 μm y arena media, 500-250 μm) son muy escasas. La clase textural predominante en los horizontes A de todos los pedones es la franco arcillo limosa (FaL: arena: <20%, limo: 40-73%, arcilla: 27-40%) acompañada por la franco limosa (FL) y una transicional franco arcillo limosa a arcillo limosa (FaL-aL). En cambio, en los horizontes B de los pedones 2, 3, 4 y 5 predomina la clase textura arcillosa (arena: <45%, limo <40%, arcilla >40%)

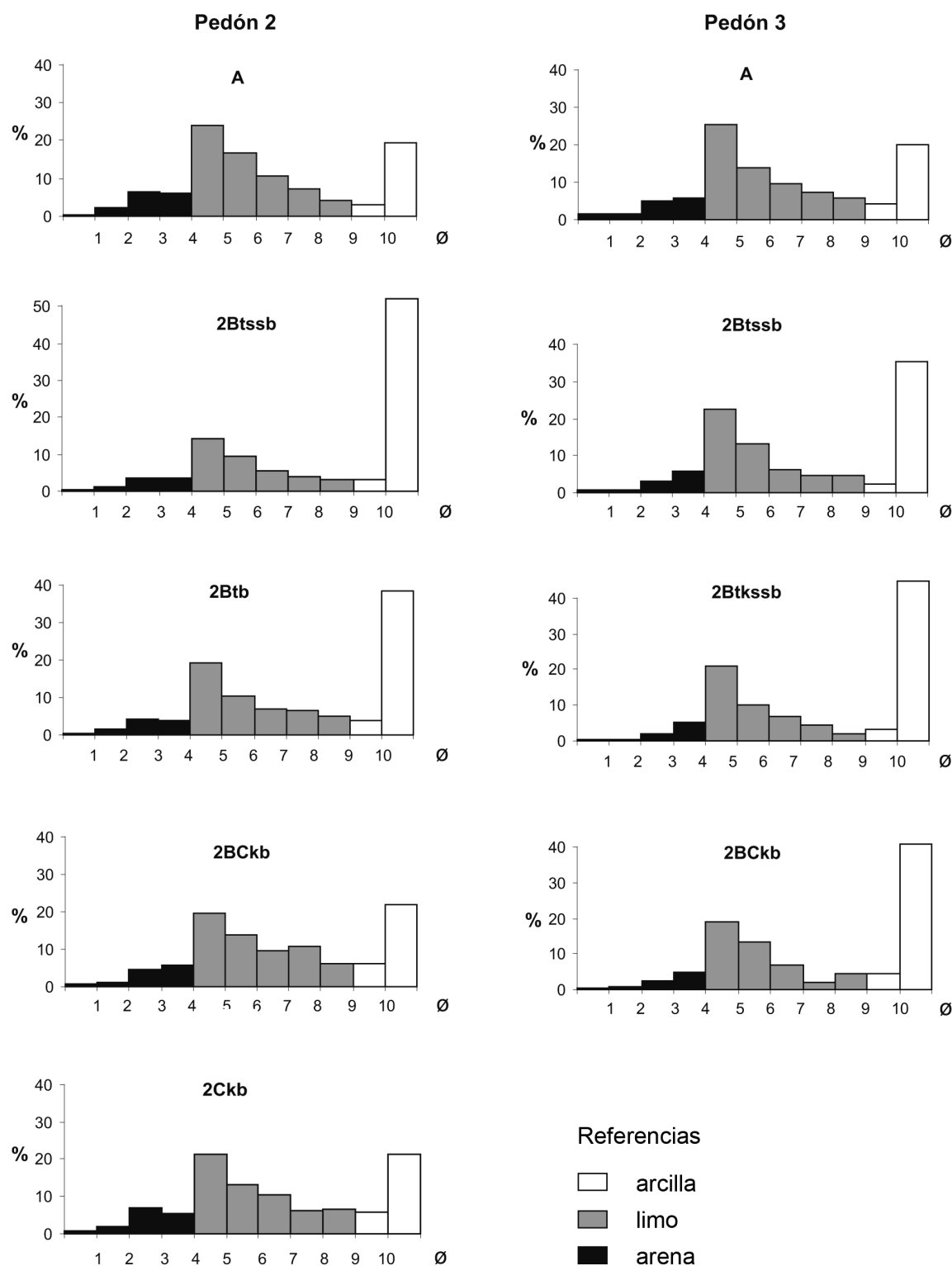


Figura 4. Distribución granulométrica de los horizontes de los Argiudoles vérticos (pedones 2 y 3). Intervalos representados a 1 Ø, excepto el último que incluye los materiales menores a 10 Ø (entre 10 y 14 Ø).

Figure 4. Grain-size distribution of the horizons from the Vertic Argiudolls (pedons 2 and 3). Intervals at 1 Ø, except the last interval which includes materials finer than 10 Ø (10-14 Ø).

acompañada por las clases arcillo limosa (aL) y franco arcillo limosa (FaL). Los horizontes A poseen textura más gruesa con mayor contenido de arena

(9-15%) y marcada abundancia de limo (54,5-62,4%) (Tabla 1), hecho que se manifiesta más claramente al calcular el contenido de las subfracciones en

base no arcillosa. Por lo tanto, el sedimento original que forma el horizonte A (pedones 2, 3, 4 y 5) correspondería a un pulso de depositación loésica con algunas diferencias granulométricas respecto al pulso anterior, como suele suceder en estos ambientes con depósitos eólicos. Así, es posible documentar una discontinuidad litológica entre los horizontes eluviales e iluviales correspondiendo a dos pulsos depositacionales con diferencias granulométricas en la fracción limo. La influencia pedogénica se manifiesta por el incremento de la fracción arcilla fina, en correspondencia con los rasgos morfológicos, principalmente estructurales, en los horizontes Bt, Btkss, Btk, donde siempre es mayor que en los horizontes cercanos a la roca. El pedón 1 difiere de los anteriores pues posee en profundidad distribución intrapedónica casi lineal de las subfracciones granulométricas arcilla y limo hasta el techo del material loésico, por tratarse de un suelo sin horizonte iluvial.

Mineralogía de arcillas. La composición mineral de la fracción arcilla de la parte loésica en los Argiudoles vérticos (pedones 2 y 3) es casi totalmente illítica, mostrando reflexiones bien definidas de ese mineral y cantidades subordinadas de minerales expandibles y caolinita (Fig. 5). En el pedón 2 el horizonte A posee 92,6% de illita, 4,6% de caolinita y 2,8% de minerales expandibles; en cambio, en los horizontes 2Btssb, 2Btb, y 2BCkb hay aumento de minerales expandibles, aproximadamente un 20%, que se manifiesta por el aumento de área en la submuestra glicolada, aunque no se observan reflexiones definidas. El horizonte 2Btssb posee 82,3% de illita, 16% de expandibles y 1,7% de caolinita; el 2Btb 82% de illita, 17% de expandibles y 1,3% de caolinita; el 2BCb 80% de illita, 17,3 de expandibles y 2,7% de caolinita. La disminución de los tenores de illita en profundidad a partir del horizonte A se corresponde con una tendencia general de aumento de arcillas expandibles.

En el pedón 3 se mantienen la tendencia de variación en profundidad del suelo ya mencionadas, aunque la illita está mejor definida y en mayor proporción. El horizonte A posee 93,5% de illita, 3,9% de caolinita y 2,7% de expandibles, el horizonte 2Btssb 88,5% de illita, 8,8% de expandibles y 2,7% de caolinita; el horizonte 2Btkssb 86,7% de illita, 10,7% de expandibles y 2,6% de caolinita y el horizonte 2BCkmb 87,6% de illita, 9,5% de arcillas

expandibles y 2,9% de caolinita.

La composición mineralógica porcentual de las especies arcillosas en ambos suelos permiten individualizar dos unidades de diferente relación composicional: la superior correspondiente al horizonte A posee mayor cantidad de illita que los materiales infrayacentes, y la inferior con aumento de minerales expandibles, sobre todo en el pedón 2, y variaciones insignificantes de caolinita. En el estado actual del conocimiento es difícil explicar las variaciones en el contenido de la fracción pelítica mediante fenómenos pedológicos de alteración y transformación mineral. Por tanto, la explicación más plausible del hecho mencionado, teniendo en cuenta además la granulometría más gruesa de la parte superior de los suelos, sería la presencia de una discontinuidad sedimentaria, tal como se menciona en un trabajo pedológico pionero para la zona (Vargas Gil *et al.*, 1982), indicando que los suelos se habrían formado sobre dos mantos de loess con algunas diferencias sedimentarias en la granulometría y en las proporciones relativas de los componentes arcillosos. Las especies arcillosas de la calcreta y de la coquina difieren respecto de las del depósito loésico, ya que en las primeras predominan las especies expandibles y en el segundo las especies illíticas. En los suelos estudiados no se encuentran arcillas fibrosas como sepiolita y paligorskita, las que están presentes en regiones áridas de la Argentina (Bouza *et al.*, 2007). El carbonato mineral es casi exclusivamente calcita, a veces con vestigios de dolomita.

El Carbonato Pedogénico

La presencia de carbonato de calcio pedogénico se menciona en casi todos los suelos del país y en suelos con distintos materiales originarios y climas. La literatura pedológica argentina abunda en referencias a horizontes afectados por el sufijo “k”, aunque hay escasos estudios detallados relacionados con la calcificación secundaria. Algunos ejemplos se presentan en zonas húmedas (Scoppa, 1978/79; Imbellone, 1996) y otros en zonas áridas, semiáridas y subhúmedas (Del Valle y Beltramone, 1987; Pazos, 1990; Buschiazzo, 1988, 1990; Amiotti *et al.*, 2001; Bouza *et al.*, 2007; Schiavo *et al.*, 2010).

En los suelos analizados hay indicadores macro y micromorfológicos que permiten identificar la presencia de carbonato de calcio de origen pedogénico, también denominado secundario,

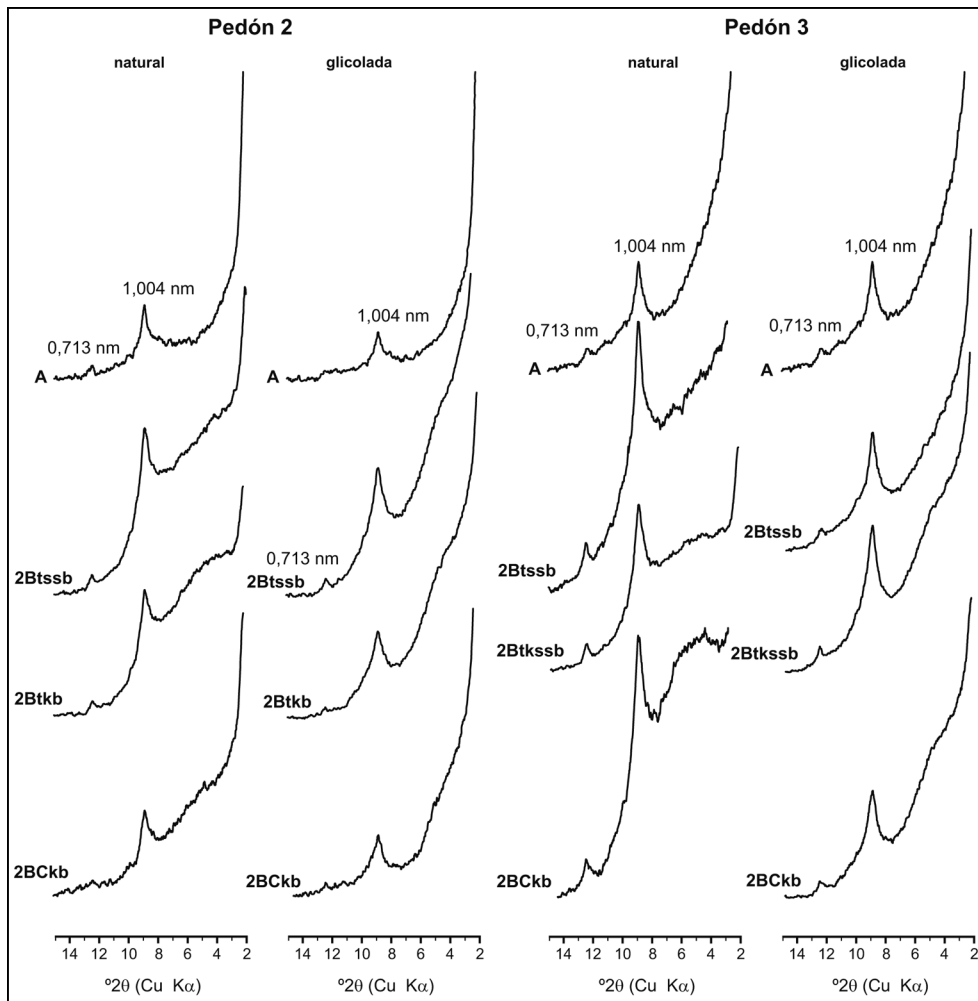


Figura 5. Registros difractométricos de los Argiudoles vérticos (pedones 2 y 3).
Figure 5. X-ray diffraction patterns of Vertic argiudolls (pedons 2 and 3).

autigénico o pedogénico, (Gile *et al.*, 1966). En los pedones 2, 3, 4 y 5 estos rasgos se observan tanto en el campo como en mayor detalle. A simple vista o con lupa se ven segregaciones blandas y pulverulentas, ya sea como seudomicelios (depósitos filamentosos de calcita secundaria en canalículos de raíces), nódulos o acumulaciones difusas distribuidas irregularmente en la matriz del suelo. También hay nódulos septáricos y redondeados con límites netos, posiblemente heredados del material loésico. Todos estos rasgos están presentes en la sección loésica de los suelos. En cambio, en el pedón 1 el carbonato de calcio pedogénico es menos visible a ojo desnudo y posee abundantes fragmentos carbonáticos de distintos tamaños provenientes de la fragmentación de la calcreta, que disminuyen en cantidad hacia la superficie, acompañados por bioclastos. En el proceso de fragmentación de la calcreta tiene influencia la actividad orgánica pues a 40 cm de profundidad, donde el carbonato compacto impide la libre penetración de las raíces, se presenta una masa

filamentosa de raíces vivas y muertas, dispuestas ya sea en forma planar sobre el horizonte petrocálcico o calcreta, entre la estructura laminar y dentro de finas grietas en la calcreta produciendo su desagregación física. La concentración de raíces entre los agregados laminares forma zonas subparalelas negras de 1 a 2 mm de espesor que contrastan con el color claro de la calcreta, y que poseen mayor o menor grado de descomposición. A veces, las zonas oscuras son untuosas y claramente humificadas; en otras, pueden distinguirse estructuras orgánicas vegetales poco humificadas. También se observan abundantes hifas de hongos entre el material mineral.

Los horizontes petrocálcicos se denominan en la literatura calcretas pedogenéticas y tienen variedad de formas macroscópicas, entre ellas, laminar. Las calcretas laminares son capas onduladas finamente laminadas, que raramente exceden los 25 cm de potencia, son duras a extremadamente duras, a veces cubren una calcreta tipo *hardpan* y son similares a las costras laminadas descritas por Gile *et al.* (1966)

y James (1972).

En nuestro caso, la calcreta laminar (horizontes 3Ckmb) de los pedones 3 y 4 no es una capa continua sino que a veces no está bien definida y hay una zona de alteración difusa entre la coquina y los horizontes loésicos. Otras veces, está mejor definida formando: a) una capa muy fina (2-4 mm) de color pardo muy pálido (10YR 8/2) en seco o b) varias capas de distintos colores: gris claro (10YR 7/2, seco) gris pardusco claro (10YR 6/2, seco) y gris rosado (7,5YR 7/2, seco) de hasta aproximadamente 4 cm de espesor, encontrándose por debajo la coquina.

Con microscopio óptico se observaron revestimientos de calcita micrítica y acicular (Fig. 3a) y concentraciones nodulares más o menos difusas, y por zonas, impregnación carbonática en la matriz del suelo de naturaleza micrítica a las que se les asigna origen pedogénico. En la coquina se observa marcada recristalización de calcita micrítica y esparítica (Fig. 3b-d).

Observaciones más detalladas realizadas con microscopio electrónico muestran cristales de calcita con morfologías de cristalización y disolución. Ambas se encuentran a veces asociadas en un mismo horizonte (Fig. 6d, horizonte 2Ckm/Akb) indicando que el proceso de carbonatación es dinámico en el suelo y está asociado a la variación de condiciones locales de las propiedades geoquímicas de cada horizonte. Las morfologías de cristalización difieren según se trate de la calcreta o de los horizontes de los suelos; en las primeras el cemento posee cristales más o menos equidimensionales llamados “en granos de arroz” y calcita esparítica; en cambio, los horizontes del solum poseen principalmente calcita acicular con distintas morfologías. No obstante, los horizontes petrocálcicos muestran alguna disolución y recristalización de calcita acicular.

La calcita acicular es una de las morfologías más comunes en la zona vadosa, ya sea en suelos y cavernas de distintas latitudes. No obstante, en los suelos se encuentran varias morfologías que pueden coexistir en un mismo horizonte u horizontes. Las mismas se muestran en la Fig. 6 y son comparables a las descritas por Phillips y Self (1987) y Verrechia y Verrechia (1994). Ellas son:

a) Calcita acicular (Fig. 6a-c) en los horizontes del solum formando masas de cristales desordenados, de entre 10 a 50 μm de longitud y 1 μm de ancho; algunos poseen su morfología bien definida de cilindros de bordes lisos que podrían estar formados por la

coalescencia de cilindros más pequeños (horizonte 2Ckb, pedón 1), o formando manojos de fibras que dejan entre sí la llamada textura alveolar o convoluta (horizonte 2Btkssb, pedón 3). Estas morfologías ya se mencionan en suelos calcáreos desarrollados en cordones de conchilla holocenos (Imbellone, 1996).

b) Calcita acicular con bordes aserrados irregulares (Fig. 6d, e) con crecimientos en planos distintos al eje longitudinal, parcialmente disueltos y/o reprecipitados, (horizonte 2Ck/Ak, pedón 1; horizonte 2Ck, pedón 2).

c) Morfologías complejas de agujas (Fig. 6e) con bordes aserrados y crecimientos irregulares sobre las agujas, formando morfologías estrelladas. Se encuentran formando venas carbonatadas dentro del loess en los horizontes 2Ckb, pedón 2, donde se encuentran abundantes biorrasgos.

d) Morfología de calcita romboédrica “en échelon” en el horizonte 2Ck/Ak, pedón 1 (Fig. 6f).

El ordenamiento espacial más frecuente de la calcita acicular es una malla abierta y de fibras de calcita desordenadas, que se soporta a sí misma, rellenando los vacíos y canales de raíces y filamentos calcificados (Fig. 7a). La disposición en la malla totalmente desordenada grada hacia una textura alveolar o convoluta. Los vacíos en la textura alveolar bien desarrollada varían desde círculos a formas de “V” distorsionadas y cuadrangulares y están rodeados por manojos de fibras. La forma de los vacíos está en parte determinada por el ángulo al cual los filamentos calcificados cruzan la textura alveolar. Cuando las fibras son cortas, con morfologías aserradas o están parcialmente disueltas y/o cementadas, forman una malla semicompacta, menos porosa y abierta. (Fig. 7b).

La calcreta laminar (Fig. 8) que constituye los horizontes petrocálcicos posee escasa calcita acicular, predominando cristales grandes (aproximadamente 10 μm), idiomorfos, de hábito tabular y romboédrico y un cemento micrítico de calcita con morfología “en granos de arroz”, por lo cual difiere en su conjunto de la morfología de la calcita pedogénica de los horizontes desarrollados en el sedimento loésico.

DISCUSION

Orígenes del Carbonato Pedogénico

El carbonato pedogénico posee importancia en la comprensión de distintos aspectos vinculados con

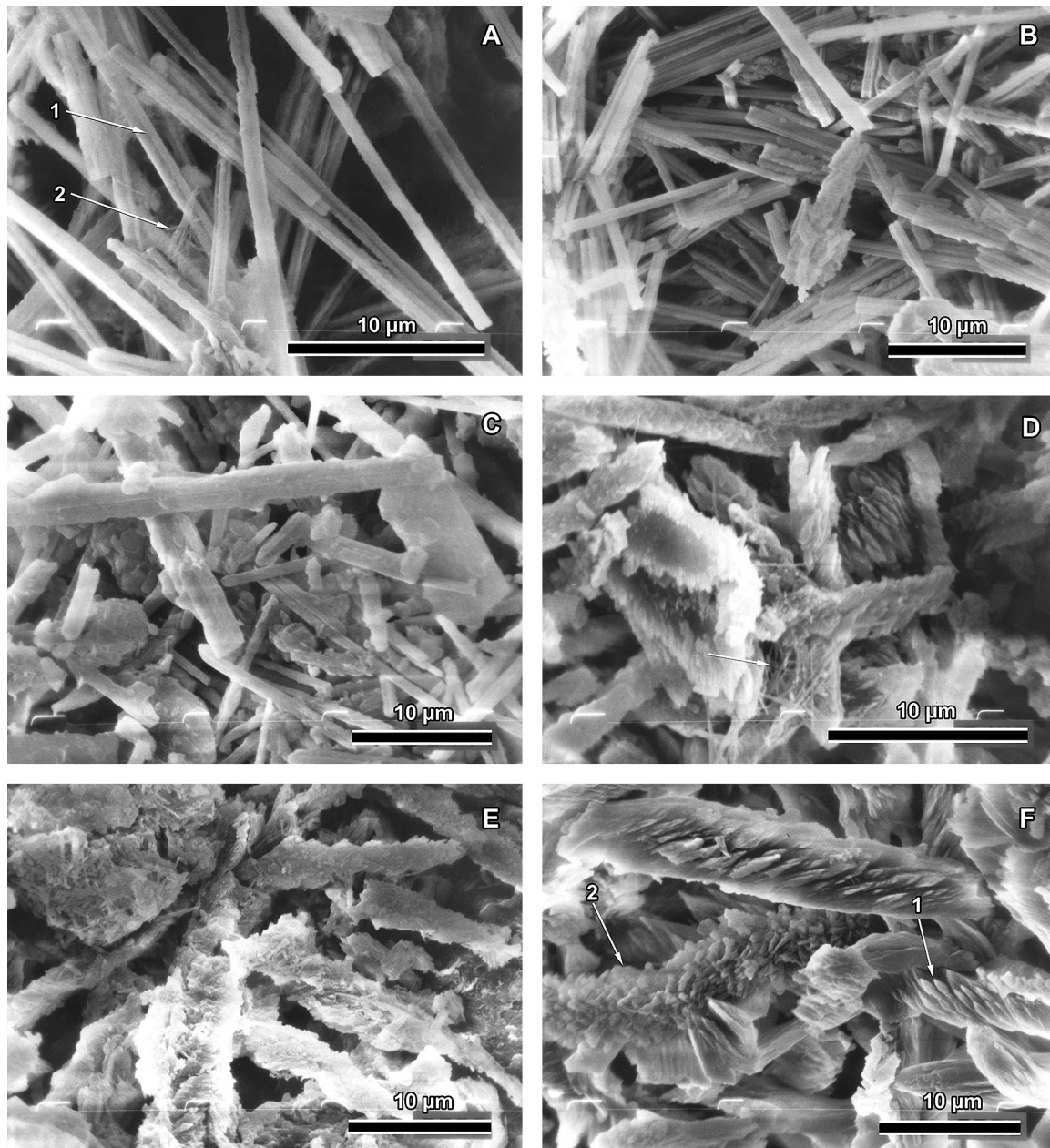


Figura 6. Morfología de calcita en horizontes enriquecidos en carbonato de calcio en pedones 1, 2 y 3. Microscopía electrónica de barrido. a) Fibras largas aparentemente formadas por varios cilindros, con surcos longitudinales entre ellos (1), constituyendo una malla abierta. Note nueva generación de agujas muy pequeñas (2) (Haprendol típico, pedón 1 horizonte 2Ckb. b) Manojos de fibras, algunas cortas algo cementadas. Argiudol vértico, pedón 3 horizonte 2Btkssb. c) Fibras de distinta longitud y grosor; obsérvese crecimientos sobre los cilindros. Argiudol vértico, pedón 2, horizonte 2Ckb. d) Morfologías complejas con bordes aserrados; agujas secundarias muy pequeñas distribuidas al azar entre cristales (flecha). Haprendol típico, pedón 1, horizonte 2Ckm/Akb. e) Morfologías con bordes aserrados, algunas mostrando rasgos de recrystalización, otras de morfología semejante a lublinita (Stoops, 1976) con ordenamiento *en échelon*. Haprendol típico, pedón 1 horizonte 2Ckb/Akb. f) Hábito *en échelon* y cristales puntiagudos (1) e hifa calcificada (2). Haprendol típico, pedón 1, horizonte 2Ckm/Akb.

Figure 6. Morphology of calcite in calcium carbonate-enriched horizons in pedons 1, 2 and 3. Scanning electron microscopy. a) Long fibers apparently composed of several rods with intervening grooves (1) forming an open mesh. Note new generation of very small needles (2) Typical haprendoll, pedon 1, 2Ckb horizon. b) Fiber bundles, some of them short and slightly cemented. Vertic argiudoll, pedon 3, 2Btkssb horizon. c) Fibers of different length and thickness; note growths on cylinders. Vertic argiudoll, pedon 2, 3Ckb horizon. d) Complex morphologies with serrated borders; very fine secondary needles randomly distributed between crystals (arrow), Typical haprendoll, pedon 1, 2Ckm/Akb. e) Morphologies with serrated borders, some showing recrystallization features, others with lublinitite-like morphology (Stoops, 1976) and *en échelon* arrangement. Typical haprendoll, pedon 1, 2Ckb/Akb horizon. f) *En échelon* habit and spiky crystals (1) and calcified fungal filament (2). Typical haprendoll, pedon 1, 2Ckm/Akb horizon.

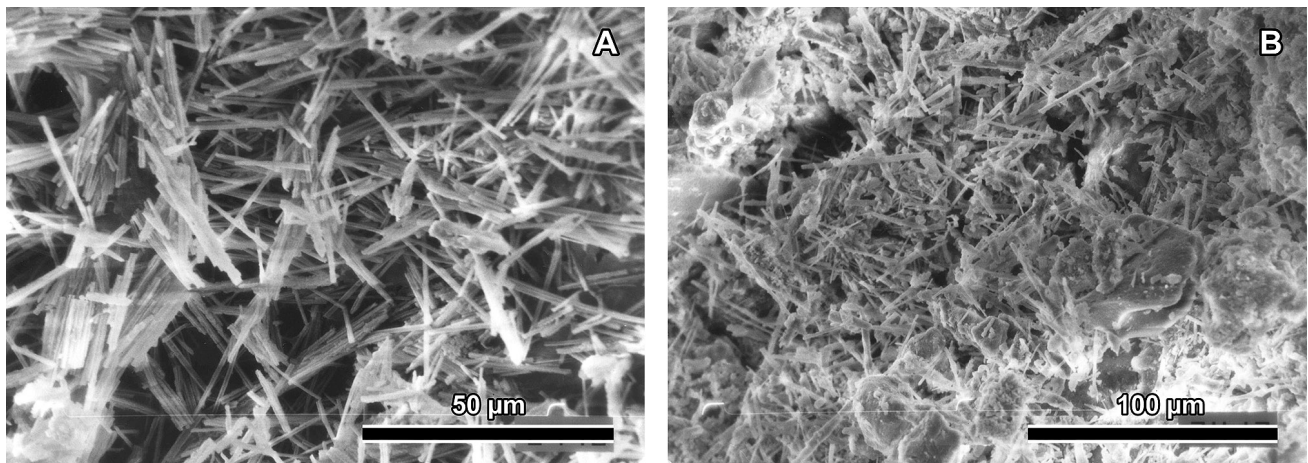


Figura 7. Ordenamiento espacial de las fibras de calcita acicular en pedón 2 estudiado mediante microscopía electrónica de barrido. a) Fibras compuestas de cilindros rectos dispuestos en una malla abierta. Parte superior izquierda se observa textura alveolar con agujero central cilíndrico, Argiudol vértico, pedón 3, horizonte 2Btkssb. b) Textura superficial más compacta formada por agujas cortas y parcialmente cementadas, Argiudol vértico, pedón 2, horizonte 2Ckb.

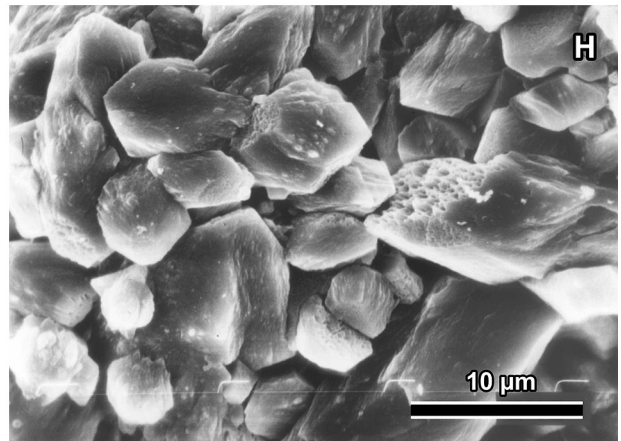
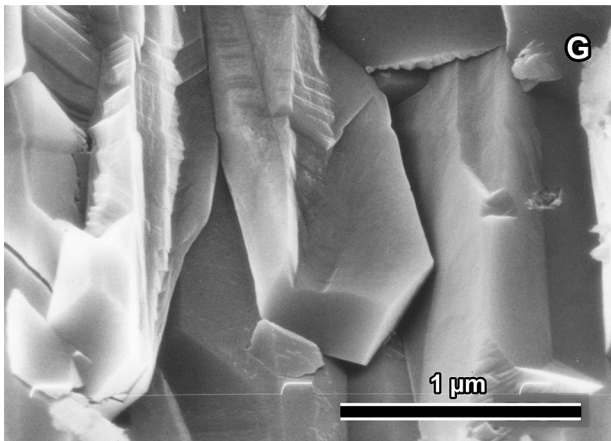
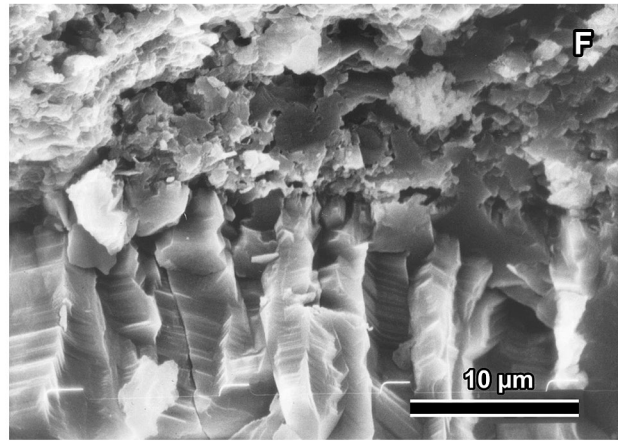
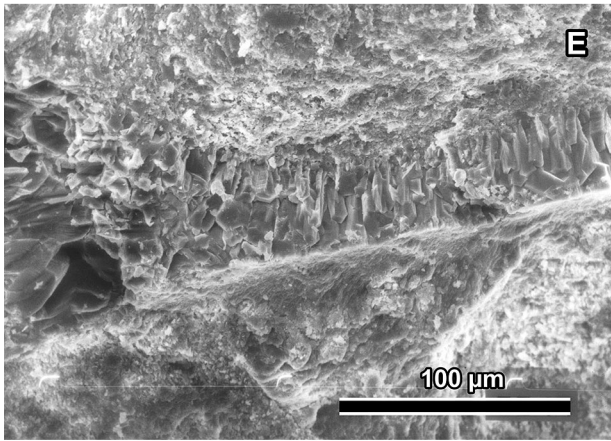
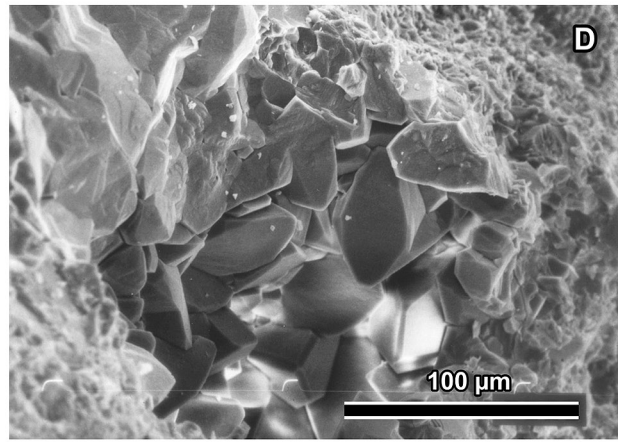
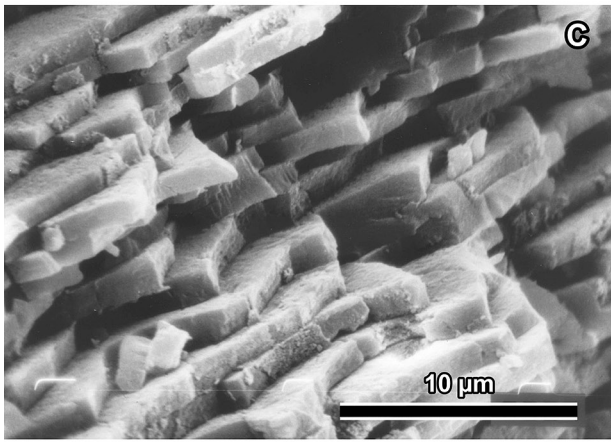
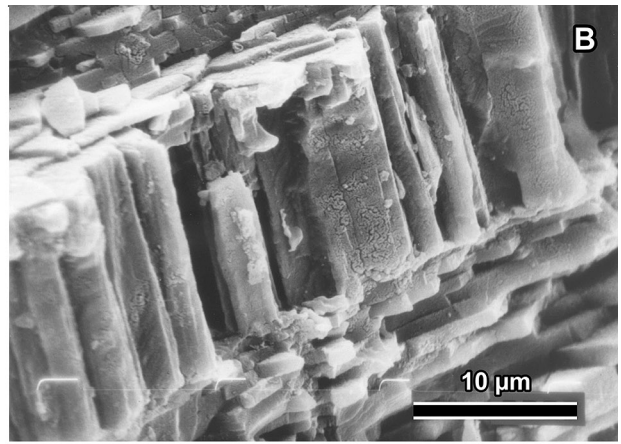
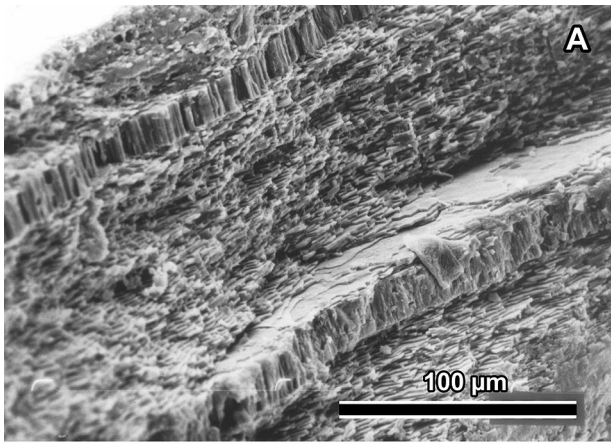
Figure 7. Arrangement of needle calcite fibers in pedon 2 studied by scanning electron microscopy. a) Fibers consisting of right rods arranged in an open mesh. Alveolar texture with a cylindrical central hole is observed at upper left. Vertic argiudoll, pedon 3, 2Btkssb horizon. b) More compact surficial texture composed of short, partially cemented needles. Vertic argiudoll, pedon 2, 2Ckb horizon.

el suelo, por ejemplo, la nutrición de las plantas, el secuestro de carbono, la determinación de la edad del paisaje, de la paleoclimatología, paleoecología, y paleopedología y como fenómeno *per se*. El clima es un factor importante que controla su formación, junto con los procesos orgánicos. Por tal razón, el carbonato pedogenético es el resultado de la coevolución e interacciones de procesos bióticos y abióticos. Los procesos bióticos producen ingreso de CO_2 al suelo por respiración, extracción de Ca^{2+} de la solución del suelo y materiales carbonáticos por raíces e hifas, y precipitación directa de carbonato por microorganismos. Estos procesos dependen también de procesos abióticos, los cuales incluyen meteorización química de silicatos cálcicos, disolución de CaCO_3 preexistente, y su reprecipitación debida a cambios de humedad y temperatura. En los suelos estudiados habría una combinación de ambos procesos; por un lado, la formación de morfologías de calcita simples a más complejas por procesos bióticos dentro de cápsulas mucilaginosas y por otro, procesos abióticos de recristalización fisicoquímica en el suelo. Por el tamaño y ordenamiento de las formas carbonatadas no es posible pensar que todas las formas se han desarrollado dentro de una cápsula orgánica, como en el caso de los crecimientos epitáxicos sobre las agujas y los cristales euedrales grandes.

Los modelos utilizados para describir la formación

del carbonato pedogénico son: *per descensum*, *per ascensum*, *in situ* y biogénico. A partir de una breve descripción de cada uno de ellos se discutirá sobre la base de los rasgos morfológicos y micromorfológicos observados, cuál sería el más adecuado para explicar la presencia de carbonato en los suelos analizados.

Movimiento descendente del agua meteórica. Se produce disolución de carbonatos preexistentes en la parte superior del perfil, translocación vertical y precipitación en el subsuelo. El ion Ca^{2+} puede provenir de la atmósfera, el agua de lluvia y/o el lavado lateral en pendientes. El modelo explica la presencia de carbonatos cada vez más superficiales en climas progresivamente más secos y viceversa. En la parte media de algunos suelos, en los horizontes denominados “enriquecidos con carbonato de calcio”, pueden observarse abundantes pseudomicelios. Si se supone que el material originario no poseía bioclastos calcáreos, el proceso de translocación sería adecuado y las fuentes de carbonato de calcio podrían ser las adiciones atmosféricas y/o superficiales. Además, sería factible la migración lateral y pendiente abajo de las soluciones carbonatadas del suelo y su precipitación. En áreas loésicas como las estudiadas suelen formarse superficies agradantes por adición de polvo atmosférico carbonatado, acompañada por la depositación superficial, disolución y translocación del mismo dentro de los suelos, por acción de las



lluvias; no obstante, no hay registros de trampas de polvo en la zona.

Elevación capilar y evaporación de agua freática calcárea. Es el ascenso capilar de Ca^{2+} y bicarbonato provenientes del agua freática. En estos suelos el nivel freático se encuentra profundo y no tendría influencia en la depositación de CaCO_3 . No obstante, en el área estudiada los suelos pueden conservar mayor contenido de humedad que otros aledaños debido a que el material compacto de la Formación Pascua situado en su base limita la percolación del agua meteórica, favoreciendo el ascenso capilar y la depositación durante la época estival. En el caso particular del pedón 1, no se descarta la posibilidad de horizontes Alfa (Pazos, 1990) ya que se observaron masas de raíces sobre las lentes de calcreta laminar y penetraciones oscuras de materia orgánica entre los planos de la calcreta. En este pedón habría una intensa acción epigénica favorecida por los procesos abióticos y la actividad biológica en su conjunto, en los 40 cm de sedimentos que sobreyacen a la calcreta y en la calcreta misma.

Disolución y reprecipitación *in situ*. Comprende la disolución y reprecipitación *in situ* de calizas y meteorización química de rocas ígneas. Dado que en el área de estudio no están presentes rocas ígneas, la disolución del depósito organógeno ubicado en la base de los suelos, la reprecipitación *in situ* y algún ascenso capilar, sería el origen más adecuado para el carbonato pedogénico encontrado en esa zona. A veces, aparece sobre la coquina una zona de calcáreo recristalizado y laminar, formando una calcreta pedogenética. El carbonato pedogénico sería

el resultado de la disolución y reprecipitación de la roca compuesta por carbonatos marinos. La caliza es así progresivamente transformada en carbonato pedogénico en la zona de contacto con el depósito loésico. Este es el único camino para que se forme carbonato pedogénico donde el contenido total de carbonato de la zona enriquecida con productos pedogénicos es menor que el contenido de la roca original. Estas zonas pedogénicas suelen tener mayor macro- y microporosidad que la caliza y favorecen la depositación secundaria de carbonato. Si bien hay minerales cálcicos en el loess que forma el material parental de los suelos, ellos son escasos, aunque podrían ser una fuente adicional mínima de Ca^{2+} .

Precipitación biogénica. Incluye la precipitación directa por bacterias, hongos, raíces de plantas y termitas. El registro más directo del origen biótico de precipitación de CaCO_3 -comunidades de microorganismos calcificados en suelos y paleosuelos- se revela mediante microscopía óptica y electrónica con grandes aumentos, aún en estados iniciales de desarrollo de carbonato pedogénico, se ve fácilmente como masas de pelos radiculares calcificados. La microscopía revela comunidades de microorganismos calcificados en suelos y paleosuelos. También ciertas bacterias tienen la capacidad de precipitar carbonatos en cultivos. La formación de filamentos calcificados se explica mejor por los modelos de Klappa (1980) y Cailleau *et al.*, (2009). En los mismos, los cristales de carbonato de calcio se forman dentro de la cubierta mucilaginoso que rodea a los microbios y pelos radiculares. Después de que el organismo muere, el material orgánico se descompone dejando tubos de carbonatos cristalinos. Las cápsulas o envolturas

Figura 8. Hábitos de cristalización en los horizontes laminares petrocálcicos. Microscopía electrónica de barrido. a) Zonas de cristalización de calcita tabular y planar dispuestas en bandas subparalelas a la superficie del contacto roca-suelo. b) Detalle de (a) con cristales tabulares verticales. c) Detalle de (a) con cristales subhorizontales. d) Romboedros y escalenoedros desarrollados en oquedades de la roca dentro de una matriz fina, Argiudol vértico, pedón 3, horizonte 3Ckmb. e) Zona de cristalización tabular dentro de una zona masiva de la calcreta. f) Detalle de (e) mostrando cristalización estalactítica colgando desde la masa micrítica, donde se observa crecimiento cristalino esparítico. g) Detalle de (f) donde se observan cristales idiomorfos, Hapludert típico, pedón 4, horizonte 3Ckmb. h) Calcita romboédrica en zonas de la calcreta, mostrando caras de cristales y superficies lisas o débil a altamente estriadas y “picadas”.

Figure 8. Crystallization habits in platy petrocalcic horizons. Scanning electron microscopy. a) Crystallization zones of tabular and planar calcite arranged in bands subparallel to the rock-soil contact. b) Detail of (a) with vertical tabular crystals. c) Detail of (a) with subhorizontal crystals. d) Rhombohedra and scalenohedra in rock holes located within a fine matrix, Vertic argiudoll, pedon 3, 3Ckmb horizon. e) Zone of tabular crystallization in a massive zone of the calcrete. f) Detail of (e) showing stalactitic crystallization pending from the micritic mass, where sparry crystalline growth is observed. g) Detail of (f) showing idiomorphic crystals, Typic hapludert, pedon 4, 3Ckmb horizon. h) Rhombohedral calcite in the calcrete showing crystal faces and smooth or weakly to highly fluted and pitted surfaces.

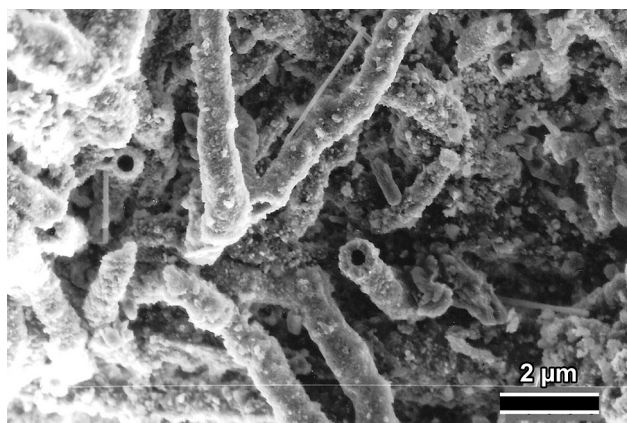


Figura 9. Biolitos tubulares calcificados en la coquina (Argiudol cálcico, pedón 5, horizonte 3R).

Figure 9. Calcified tubular bioliths in the coquina (Calcic argiudoll, pedon 5, 3R horizon).

mucilaginosas proveen un medio acuoso donde Ca^{2+} y HCO_3^- se combinan. Teóricamente, las cápsulas mucilaginosas serían zonas donde se concentra el HCO_3^- por la respiración; así el exceso de Ca^{2+} no utilizado por las raíces e hifas podría ser concentrado después de ser extraído del suelo (Monger *et al.*, 1991; Monger, 2002).

En los suelos estudiados hay fuerte participación biogénica observada por la presencia frecuente de biolitos tubulares cubiertos por calcita microcristalina como en el horizonte 2Ckb/Akb del pedón 1 (Fig. 6f). También se encuentran en zonas de cemento calcáreo en la coquina propiamente dicha (horizonte 3R, pedón 5), como se muestra en la figura 9.

CONCLUSIONES

Los suelos analizados en la zona litoral de la provincia de Buenos Aires poseen dos materiales originarios de diferente naturaleza. En la base, los depósitos carbonáticos de la Formación Pascua, tienen influencia en los horizontes inferiores de los suelos. Suprayaciendo hay materiales loésicos que constituyen el material originario de los suelos, donde hay rasgos de la interacción de varios procesos pedogenéticos coetáneos o no: iluviación de arcilla, carbonatación, vertigénesis. Los suelos se desarrollan mayormente en los depósitos loésicos que cubren la Formación Pascua. La relación existente entre éstos y dicha formación está expresada por la presencia de carbonatos pedogenéticos generados por disolución y reprecipitación de los carbonatos de la Formación Pascua en la base de los suelos y por su contribución

en la formación de horizontes con enriquecimiento calcáreo.

Los suelos poseen evolución calcárea, con horizontes enriquecidos con CaCO_3 (Ak, Btk, Btkss y Bck) y/o horizontes cálcicos (Bck y Ck) y/o horizontes petrocálcicos (Ckm). En el último caso constituyen una calcreta pedogénica de clima húmedo. Esta calcreta denominada *horizonte petrocálcico* es a su vez un horizonte pedológico (cuando tiene más de 2 cm de espesor) y una zona de alteración de la coquina. Se habría formado por procesos de epigénesis bajo la influencia pedogenética por alteración de la coquina.

Distintas morfologías de carbonato de calcio pedogenético, que no son exclusivas de cada horizonte, están presentes en los suelos: por un lado, calcita de hábito acicular que se encuentra principalmente en la sección loésica de algunos suelos y, por otro, formas romboédricas y escalenoédricas en la calcreta laminar que ha evolucionado en la parte superior de la Formación Pascua.

El proceso de carbonatación sería de origen mixto: a) por reorganización de la roca basal y b) por translocación en clima húmedo; en ambos casos el carbonato pedogenético tendría origen abiótico con participación biótica. Predomina la cristalización y recristalización, ya sea por disolución de depósitos preexistentes o por soluciones carbonatadas de desplazamiento vertical y lateral, interviniendo asimismo la biomineralización en estructuras orgánicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dra. Ofelia Rita Tófaló y un revisor anónimo por sus valiosas sugerencias; a la Dra. Alfonsina Tripaldi por sus comentarios editoriales y al Dr. Miguel Del Blanco (Instituto de Recursos Minerales, INREMI-FCNyM-UNLP) por su colaboración en la obtención de microfotografías ópticas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allison, L.E. y C.D. Moodie, 1965. Carbonate. En: Black, C.A., D.D. Evans, L.E. Ensminger, J.L. White y F.E. Clark (Eds.). *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy (Part 2): 1379-1396.
- Ameghino, F., 1880-1881. *La Antigüedad del Hombre en el Plata*. En Obras Completas Vol. III. Cap. XX a XXIV (Ed. 1905). Oficina de Gobierno Provincia de Buenos Aires, 868 pp. La Plata.

- Amiotti, N., M.C. del Blanco y L.F. Sánchez, 2001. Complex pedogenesis related to differential aeolian sedimentation in microenvironments of the southern part of the semiarid region of Argentina. *Catena* 43:137-156.
- Birkeland, P.W., 1984. *Soils and geomorphology*. Oxford University Press. 372 pp.
- Biscaye, P.E., 1965. Mineralogy and sea sedimentation of recent deep-sea clays in the Atlantic ocean and adjacent seas and oceans. *Geological Society of America Bulletin* 76:803-832.
- Bouza, P.J., M. Simón, J. Aguilar, H. del Valle y M. Rostagno, 2007. Fibrous-clay mineral formation and soil evolution in Aridisols of Notheastern Patagonia, Argentina., *Geoderma* 139:38-50.
- Buol, S.W., F.D. Hole y R.J. McCracken, 1989. *Soil genesis and classification*. Iowa State University Press, Ames. 3ª edición. 446 pp.
- Buschiazzo, D.E., 1988. Estudio sobre la tosca. Parte II: evidencias de un movimiento descendente del carbonato, características micromorfológicas. *Ciencia del Suelo* 6:44-49.
- Buschiazzo, D.E., 1990. Calcrete formations in soils of the Argentinean Pampas. *Ernst-Schlichting Gedächtnis-Kolloquium*. Tagungsband: 92-106. Hohenheim.
- Cabrera, A.L. y E.M. Zardini, 1993. *Manual de la flora de los alrededores de Buenos Aires*. Ed. Acmé. Buenos Aires. 755 pp.
- Cailleau, G., E.P. Verrecchia, O. Braissant y E. Laurent, 2009. The biogenic origin of needle fibre calcite. *Sedimentology* 56:1858-1875.
- Cappannini, D.A., 1949. *Estudio geodafológico del curso inferior del río Salado (provincia de Buenos Aires) y zonas adyacentes*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. La Plata (inédito). 89 pp.
- Cappannini, D.A., 1952. Geodafología del curso inferior del río Salado de la provincia de Buenos Aires. *IDIA* 50-51:1-54.
- Colado, U.R., A.J. Figini, F. Hidalgo y E. Fucks, 1995. Los depósitos marinos del Cenozoico Superior aflorantes en la zona comprendida entre Punta Indio y el río Samborombón, provincia de Buenos Aires. *IV Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses*, Junín. Actas 1:151-158.
- Cortelezzi, C., 1993. Sobre la edad de los depósitos de conchilla que afloran en las proximidades de Puente de Pascua, partido de Castelli, provincia de Buenos Aires. *12 Congreso Geológico Argentino*. Actas, 249-251.
- Del Valle, H.F. y C.A. Beltramone, 1987. Morfología de acumulaciones calcáreas en algunos paleosuelos de Patagonia oriental (Chubut). *Ciencia del Suelo* 5:77-87.
- FAO, 2009. *Guía para la descripción de suelos*. 4ª edición. U.N. Food and Agriculture Organization. Roma. 111 pp.
- Fidalgo, F., 1983. Algunas características de los sedimentos superficiales de la Cuenca del Río Salado y en la Pampa Ondulada. *Coloquio Internacional de Hidrología de Grandes Llanuras*, UNESCO, Olavarría. Actas II:1043-1068.
- Fidalgo, F., U. Colado y F. De Francesco, 1973. Sobre ingresiones marinas en los Partidos de Castelli, Chascomús y Magdalena, Provincia de Buenos Aires. *Actas V Congreso Geológico Argentino*. Buenos Aires. III: 227-240.
- Frenguelli, J., 1957. Neozoico. En *Geografía de la República Argentina*. Sociedad de Estudios Geográficos GAEA. T. 2, 3ª Parte. Buenos Aires. 1-218.
- Fucks, E.E., Schnack E.J. y M.L. Aguirre, 2010. Nuevo ordenamiento estratigráfico de las secuencias marinas del sector continental de la Bahía Samborombón, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 67 (1):27-39.
- Gile, L., F.F. Peterson y R.B. Grossman, 1966. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. *Soil Science* 101:347-360.
- Goudie, A.S., 1983. Calcrete. En A.S. Goudie y K. Pye (Eds.) *Chemical sediments and geomorphology: precipitates and residua in the near surface environment*. Academia Press. 83-131.
- Imbellone, P.A., 1996. Redistribución de carbonato de calcio en sucesiones cuaternarias de la llanura costera bonaerense. *AAS Revista* 3:63-76.
- Imbellone, P.A. y J.E. Giménez, 1997. Micromorphology of soils in quaternary littoral sequences. Northeastern Buenos Aires Province, Argentina. En S. Shoba, M. Gerasimova y R. Miedema (Eds.) *Soil Micromorphology: studies on soil diversity, diagnostic and dynamics*. Moscú-Wageningen. 93-105.
- Imbellone, P.A. y J.E. Giménez, 1998. Suelos calcáreos litogénicos del NE de la provincia de Buenos Aires. *Ciencia del Suelo* 16:20-29.
- Imbellone, P.A., J.E. Giménez y J.L. Panigatti, 2010. *Suelos de Región Pampeana. Procesos de formación*. Ediciones INTA. 320 pp.
- Isla, F.I., N. Rutter, E.J. Schnack y M.A. Zárate, 2000. La transgresión Belgranense en Buenos Aires. Una revisión a 100 años de su definición. *Revista Cuaternario y Ciencias Ambientales*. Publicación Especial N° 4:3-14.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos N° 103. (Traducción al español de M.S. Pazos). FAO, Roma.
- James, N.P., 1972. Holocene and Pleistocene calcareous crust (caliche profiles: criteria for subaerial exposure. *Journal of Sedimentary Petrology* 42:817-836.
- Jenny, H., 1994. *Factors of soil formation. A system of quantitative pedology*. Dover Publications, New York. 281 pp.
- Klappa, C.F., 1980. Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance. *Sedimentology* 27:613-629.
- León, R.J.C., G.M. Rusch y M. Oesterheld, 1984. Pastizales pampeanos. Impacto agropecuario. *Phytocoenologia* 12:201-218.
- Monger, H.C., 2002. Pedogenic carbonate. Link between biotic and abiotic CaCO₃. *International Working Meeting on Soil Micromorphology*. Simp. 20. Paper 937. Tailandia.
- Monger, H.C., L. Daugherty, W. Lindemann y C. Liddell, 1991. Microbial precipitation of pedogenic calcite. *Geology* 19:997-1000.
- National Soil Survey Center, 1996. *Soil survey laboratory methods manual*. Soil Survey Investigations Report N° 42. Version 3.0. U.S. Department of Agriculture. 693 pp.
- Pazos, M.S., 1990. El horizonte Alfa: una capa desarrollada en la interfase suelo-tosca. *Ciencia del Suelo* 8:75-78.
- Phillips, S.E. y P.G. Self, 1987. Morphology, crystallography and origin of needle fiber calcite in Quaternary pedogenic calcretes of South Australia. *Australian Journal of Soil Research* 25:429-444.
- Rabenhorst, M.C. y L.P. Wilding, 1986. Pedogenesis on the Edwards Plateau. Texas: III. New model of the Formation of Petrocalcic Horizons. *Soil Science Society of America Journal* 50:693-699.
- Sánchez, R.O., 1976. Estudio bioquímico mineralógico y micromorfológico de suelos "Rendzina". *IDIA* (Supl. 33):414-

424.

- Schiavo, H.F.G., A.R. Becker, M. Grumelli y M. P. Cantú,** 2010. Análisis micromorfológico del calcreto de la zona de Tosquita, departamento de Río Cuarto, provincia de Córdoba. *XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario. Resúmenes: 268.
- Schnack, F.J, Fl. Isla, F.O. De Francesco y E.E. Fucks,** 2005. Estratigrafía del Cuaternario marino tardío en la provincia de Buenos Aires. *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*: 159-181.
- Schoeneberger, P.J., D.A. Wysocki, E.C. Benham, y W.D. Broderson,** 2000. *Libro de campaña para descripción y muestreo de suelos*. National Soil Survey Center, U.S. Department of Agriculture (Traducción por investigadores del Instituto de Suelos, INTA, Argentina).
- Scoppa, C.O.,** 1978/79. Micropedología de series de suelos característicos del noreste bonaerense. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. Serie 3, Clima y Suelo XIV:37-69.
- Soil Survey Staff,** 1999. *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Agricultural Handbook 436. 2nd edition. USDA. Washington DC. 869 pp.
- Soil Survey Staff,** 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. 11th Edition. USDA. Washington DC. 338 pp.
- Soil Survey Division Staff,** 1993. *Soil Survey Manual*. Handbook N° 18. USDA, Washington D.C., U.S.A. 437 pp.
- Stoops, G.J.,** 1976. On the nature of "lublinité" from Hollanta (Turkey). *American Mineralogist* 61:172.
- Thorntwaite, C.W.,** 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94.
- Thorntwaite, C.W. y J.M. Mather,** 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology. *Climatology* 10:185-311.
- Tricart, J.L.F.,** 1973. *Geomorfología de la Pampa Deprimida. Base para los estudios edafológicos y agronómicos*. Plan Mapa de Suelos de la Región Pampeana. Colección Científica N° XII. INTA, Buenos Aires. 202 pp.
- Vargas Gil, J.R; C.O. Scoppa y A.M. Iñiguez,** 1972. Génesis de los suelos de la región norte de la Bahía de Samborombón. *RIA*, INTA. Buenos Aires. Serie 3, Clima y Suelo IX:29-52.
- Verrecchia, E.P. y K.E. Verrecchia,** 1994. Needle-fiber calcite; a critical review and a proposed classification. *Journal of Sedimentary Research* 63:650-664.
- Vervoost, E.B.,** 1967. *La vegetación de la República Argentina. VII. Las comunidades vegetales de la Depresión del Salado (Provincia de Buenos Aires)*. Serie Fitogeográfica N° 7. INTA. 262 pp.
- Violante, R.A., G. Parker y J.L. Cavallotto,** 2001. Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la Bahía de Samborombón y la laguna Mar Chiquita durante el Holoceno. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56:51-66.