

Capítulo 6: Micromorfología de suelos

Perla A. Imbellone, Elisa Beilinson y Emilia Y. Aguilera

Introducción

La génesis de suelos involucra el conocimiento de procesos pedológicos de horización y haploidización. Estos son el resultado de la reorganización de los materiales bio-minerales como parte de la epigénesis que conduce a la evolución pedológica o a su detención. La observación de los rasgos que presentan los suelos es la clave para discernir el tipo y sentido de los procesos. Esta observación se realiza en primer lugar a escala macroscópica y luego microscópica; en este camino es necesario poseer conocimientos geológicos primero y pedológicos después, para comprender: a) la formación del material originario como resultado de la evolución de una roca, sedimento o material antrópico y, b) el material del suelo en sí mismo o solum, como reorganización de aquel. Para ello es necesario conocer la mineralogía de los suelos como se presentó en otro capítulo de este libro, y también la micromorfología que muestra cómo se reordenan y evolucionan los distintos componentes ante los procesos pedológicos y geomorfológicos asociados. Por tanto, Mineralogía y Micromorfología de suelos constituyen un conjunto temático básico para conocer la fase sólida de los suelos y sus interacciones con otras fases físicas.

El esquema genético de evolución del material superficial de la corteza terrestre constituye el marco conceptual para la inclusión de los casos de estudio argentinos que se eligieron a fin de mostrar el uso de mineralogía y la micromorfología en la génesis de los suelos: a) el primer caso se refiere a evolución pedológica de suelos actuales donde hay actividad biológica, humificación y movilización de arcilla y sesquióxidos, y se formaron en depósitos transportados de loess; b) el segundo caso involucra procesos de carbonatación, vertisolización y movilización de arcilla en suelos pleistocenos enterrados, también formados en depósitos de loess; c) el tercero se refiere a la evolución de un saprolito granítico paleozoico donde hay meteorización de la roca original y formación del material originario del suelo.

¿Qué es la micromorfología de suelos?

La micromorfología de suelos es un método de estudio de muestras no disturbadas de suelos y regolitos con técnicas microscópicas y ultramicroscópicas, a fin de determinar los diferentes constituyentes y establecer sus mutuas relaciones, en espacio y tiempo (Stoops, 2003). Esta metodología tiene la ventaja que permite visualizar todos los elementos que constituyen el suelo mediante sus propiedades ópticas ya sean minerales, orgánicos o artefactos, a la vez que su distribución relativa dentro del conjunto. Este hecho muestra la redistribución de componentes del material del suelo ya sea en los procesos de horizontación o haplodización. La micromorfología de suelos es de amplia aplicación en Geología del Cuaternario y Geomorfología (Mücher y Morozova, 1983), Arqueología (Courty *et al.*, 1989); Pedología, Paleopedología, meteorización y neoformación, Agronomía, etc. (Rutheford, 1973; Fitz Patrick, 1984; Douglas y Thompson, 1985; Douglas, 1990; Ringrose-Voase y Humphreys, 1994) y su evolución es constante (Kapur *et al.*, 2008).

Existen diferentes sistemas específicos para describir la fase sólida orgánica e inorgánica y el espacio poral del suelo y sus interrelaciones. Los primeros fueron descriptivos/interpretativos (Kubierna, 1938; Brewer, 1964) en cambio los más modernos tienden a ser descriptivos (Bullock *et al.*, 1985; Stoops, 2003; Stoops *et al.*, 2010; Loaiza *et al.*, 2015). En Argentina los primeros trabajos utilizaron el sistema de Brewer (Stephan *et al.*, 1977; Scoppa, 1978/79; Fadda, 1969), aunque desde hace aproximadamente 30 años en docencia e investigación suelen usarse los últimos, tanto en suelos como en paleosuelos (Cátedra de Micromorfología de Suelos, UNLP; Figueira y Stoops, 1983; Pazos y Stoops, 1987; Becker *et al.*, 1997; Imbellone y Cumba, 2003; Blanco y Stoops, 2007; Beilinson, 2011; Beilinson y Raigemborn, 2013, entre otros).

Es necesario conocer el sistema descriptivo para luego interpretar el significado de cada rasgo, al igual que cuando se hace la descripción de campo. Por lo tanto se mencionan a continuación los principales conceptos descriptivos básicos del sistema de Bullock *et al.*, 1985 (Tabla 1).

Conceptos básicos

Fábrica (fabric): el concepto fue introducido por primera vez por Kubierna (1938). Si bien existen diferentes conceptos acerca de la *fábrica del suelo*, según Bullock *et al.* (1985), es la organización general del suelo, expresada por el ordenamiento espacial, la forma, el tamaño y la frecuencia de los constituyentes (sólidos, líquidos y gaseosos) desde un punto de vista funcional y genético.

Estructura - microestructura: Como en el caso anterior, hay varias definiciones de *estructura del suelo*, que es posible agrupar en: a) aquella que considera para su definición sólo la organización de las partículas primarias en agregados sin tener en cuenta la presencia de vacíos (estructura del suelo: combinación u ordenamiento de partículas primarias del suelo en unidades secundarias o *peds*) (Soil Science Society of America, 2001), y b) aquella que tiene en cuenta la presencia de vacíos (i.e. Brewer, 1964; Bullock *et al.*, 1985), que es el concepto micromorfológico. Un concepto integrador es considerar a la estructura y/o microestructura del suelo (según la escala de observación) al tamaño, forma y ordenamiento de que las partículas primarias y los vacíos asociados, tanto en materiales con o sin agregación, y al tamaño, forma y ordenamiento de los agregados, cuando están presentes.

Al analizar la microestructura del suelo se toman en cuenta varios parámetros: a) el tipo de agregado (forma general que presenta el agregado; b) el grado de pedalidad (ej.: si el agregado está completamente rodeado por vacíos, es fuerte y el grado de pedalidad se indica como *fuertemente desarrollada*, y viceversa); c) abundancia, tamaño, rugosidad, acomodación de los agregados; d) diseño de distribución de los agregados; e) tipos de vacíos; f), forma, tamaño y abundancia de los vacíos, etc. El *tipo de microestructura* presente en un suelo se define entonces según la combinación de todos los parámetros citados anteriormente.

Material grueso y fino (concepto c/f): como se estableció en el capítulo de Mineralogía, los suelos cuentan con una amplia variedad granulométrica. Hasta la década de 1970, se utilizaban los conceptos de plasma (<2µm) y esqueleto (>2µm) en base al tamaño granulométrico de las partículas del suelo, y a su estabilidad ante los procesos pedológicos. Sin embargo, al reconocerse que los suelos presentan una gran variabilidad granulométrica, se propuso que el límite entre los componentes gruesos y finos no fuera un valor fijo, sino un valor variable en relación a la granulometría de cada unidad bajo estudio (Stoops y Jongerius, 1975). De este modo se introdujo el concepto *c/f (coarse/fine)*, que establece la relación estimativa de los componentes gruesos y finos que se ven en la sección delgada. Los extremos de las relaciones son (Tabla 1): a) mónica: fábrica constituida por un solo tamaño de grano y; b) porfirica: unidades de fábrica grandes inmersas en una masa basal de unidades más pequeñas. En la Tabla 1 se presentan algunos otros ejemplos así como su denominación.

Componentes básicos minerales y orgánicos (basic mineral components; basic organic components): son las unidades más simples (granos de cuarzo, partículas arcillosas, restos de plantas, artefactos, etc.) que se observan en un corte delgado por microscopía óptica. Pueden ser componentes básicos gruesos (granos minerales, fragmentos de roca, residuos inorgánicos de origen biológico, artefactos,

etc.) y finos (partículas muy pequeñas, compuestos coloidales, etc.); los primeros son fácilmente identificables por sus propiedades ópticas individuales debido a su tamaño discernible; en cambio, los segundos son descriptos por propiedades de conjunto como color, limpidez, colores de interferencia, etc., debido a su tamaño demasiado pequeño para ser individualizados. Estas partículas del suelo pueden ser heredadas del material original o pueden haber sido formadas por alteración de los mismos. Se refiere al lector al capítulo de Mineralogía de suelos para un repaso de las características de los componentes minerales gruesos.

Masa basal o fondo matricial (groundmass, micromass): este concepto se aplica al conjunto del material fino y grueso, que forma el material del suelo, sin rasgos pedológicos y donde eventualmente se forman los mismos, es decir aquella parte de la fábrica de un suelo no afectada por los pedorrasgos (Bullock *et al.*, 1985). Suele utilizarse el término *micromasa* para hacer referencia a la fracción más fina de la masa basal. El término “groundmass” correspondería al término “*s-matrix*”, matriz-s de Brewer (1964).

La fábrica del material fino basal, también conocida como fábrica *plásmica*, involucra a la disposición, tamaño y forma de sus constituyentes. Ya que generalmente se trata de material muy fino, arcilloso, el mismo no puede diferenciarse en individuos durante su estudio bajo el microscopio óptico. Debido a esto se trabaja con los analizadores del microscopio cruzados, y se describe la fábrica del material basal del suelo en base a los patrones de birrefringencia (orientación y distribución) resultantes de los colores de interferencia (Bullock *et al.*, 1985). A este tipo de fábrica del suelo se la denomina *fábrica de birrefringencia* o *fábrica-b* y se clasifica en tres grupos principales, según se indica en la Tabla 1.

Pedorrasgos (pedofeatures ó rasgos pedológicos s/Brewer y Sleeman, 1960): se trata de unidades discretas de la fábrica en el material del suelo que son el resultado de procesos pedológicos actuales o pasados (Bullock *et al.*, 1985). Son discernibles de su entorno por diferencias en la concentración de uno o más componentes (i.e. fracción granulométrica, materia orgánica, cristales, componentes químicos, etc.).

Existen seis tipos principales de pedorrasgos. Su clasificación se realiza mediante la aplicación de una clave. En ésta se compara al pedorrasgo con la definición de la primera llave. Si los criterios no concuerdan, se pasa a la segunda llave y así sucesivamente hasta encontrar la llave con la cual los criterios del pedorrasgo coinciden. Los seis grupos o llaves principales son (Tabla 1): 1) *pedorrasgos texturales*: asociados a la concentración de una fracción granulométrica específica debido a transporte mecánico (e.g. Moretti *et al.*, 2012); 2) *pedorrasgos de pérdida (depletion)*: asociados a la pérdida de componentes químicos cuando se los compara con la matriz adyacente; 3) *pedorrasgos cristalinos*: compuestos por cristales, de

cualquier tamaño, distinguibles bajo microscopio óptico (e.g. Imbellone, 2014); 4) *pedorrasgos amorfos o criptocristalinos*: vinculados a transporte no mecánico; se trata de material isótropo excepto por inclusiones birrefringentes de materia orgánica o minerales (e.g. Zappino, 2010); 4) *pedorrasgos de fábrica*: aquellos que se diferencian del material adyacente sólo por presentar una fábrica diferente (e.g. Imbellone y Cumba, 2003; Beilinson, 2011); 6) *pedorrasgos excrementales*: con una forma vinculada a excrementos de animales en el suelo (ejs. Blasi *et al.* 2001). Cuando un pedorrasgo presenta características conjuntas e individualizables, de más de un grupo se denomina *pedorrasgo compuesto* como por ejemplo texturales-amorfos, texturales-cristalinos (Pazos, 1990).

Aplicaciones de la mineralogía y micromorfología de suelos

A fin de establecer una presentación ordenada y señalando una secuencia de trabajo, en todos los ejemplos se introduce al lector en las características del sitio, la descripción macromorfológica de perfiles tipo y la descripción micromorfológica, haciendo a partir de las mismas consideraciones interpretativas. En los tres ejemplos se eligieron perfiles monogenéticos (actuales o antiguos), a fin de simplificar esta presentación.

Caso 1. Micromorfología de suelos actuales

El caso de estudio incluye dos suelos de la Pampa Ondulada, Partido de La Plata, provincia de Buenos Aires: un Argiudol vértico (34° 59' 20''S, 57° 59' 48''O): A, 0-29 cm; AB, 29-37 cm; Bsst1, 37-57 cm; Bsst2, 57-88 cm; Bsst3, 88-115 cm; BC1t, 115-160 cm; BC2, 100-196 cm; C, 196-220+ cm; y un Argialbol típico (34° 59' 17''S, 57° 59' 41''O): A, 0-18 cm; E, 18-28 cm; Bt1, 28-53 cm; Bt2, 53-110 cm; BCg, 110-130 + cm; Cg, > 150 cm (Soil Survey Staff, 1999). Ambos forman parte de una hidro-toposecuencia de aproximadamente 400 m desarrollada en sedimentos loésicos. Son suelos profundos con un solum de cerca de 2 m donde el sedimento loésico posee abundante contenido de limo (entre 20 y 40 % de arcilla, 50% de limo y 15 y 20% de arena). El Argiudol vértico es bien a moderadamente bien drenado y el Argialbol típico es pobremente drenado por su posición catenaria, la que influye marcadamente en los rasgos pedológicos de cada uno de ellos.

Para el presente análisis se utilizaron secciones delgadas de tamaño grande (5 por 8 cm) y se analizaron los 3 horizontes más superficiales donde los procesos de pedogénesis actual son bien marcados. En el Argiudol vértico predominan los procesos de melanización, bioturbación en horizontes A, y vertisolización en

horizontes B. En el Argialbol, a los procesos mencionados se suma marcadamente el de hidromorfismo. En base a la composición textural general de que se dispone ambos suelos serían suelos monogenéticos, aunque no se descarta una discontinuidad litológica debida a subfracciones de limo. En este caso de estudio la diferenciación mineralógica mediante micromorfología es difícil de verificar por que la mayor parte del material grueso es limoso y está inmerso en el material fino.

Hay marcada horizontación pedogenética manifestada en las observaciones de campo y micromorfológicas. En éstas últimas se pueden apreciar adicionalmente los detalles de la naturaleza y abundancia relativa de los rasgos pedológicos de pedoturbación, illimerización e hidromorfismo en los distintos horizontes y confirmar la naturaleza autógena de los rasgos de hidromorfia (Tabla 2).

En ambos suelos el ordenamiento del material grueso es al azar, en cambio el material fino que constituye la masa basal a veces posee fuerte ordenamiento, ya sea por ordenamiento de paquetes arcillosos o por actividad de la fauna.

Argjudol vértico

Horizonte A (sección tomada entre 12 y 20 cm de profundidad). Se caracteriza por sectores con una microestructura esponjosa con pocos agregados separados y abundante espacio poral generalmente interconectado (Fig. 1a) típica de los epipedones mólicos, y por sectores con microestructura migajosa con agregados rugosos más o menos redondeados. En este caso el material fino junto con los granos gruesos forma unidades discretas ligeramente empaquetadas con alto porcentaje de excrementos de la fauna y túbulos. El material fino es oscuro y casi isotrópico. Los biovacíos son destacables en todo el horizonte: se trata de cavidades mamelonares, interconectadas o no por fisuras finas, canales y cámaras a veces con raíces vivas en el interior (Fig. 1b). Los canales forman sistemas de canales longitudinales irregulares, de variado espesor, algunos con restos de raíces en su interior. Hay secciones transversales de raíces de hasta 4 mm de diámetro. La fábrica de birrefringencia es puntuada, reflejando la composición granulométrica con abundancia de partículas de limo (limo: 58,6%; arcilla: 23,7%; arena: 17,7%), visible donde el material no está bioturbado.

La presencia de biorrasgos en los suelos es importante pues: a) muestra el grado de actividad de la fauna y condiciones ambientales y, b) contribuyen con sus metabolitos a formar la estructura del suelo por la incorporación de materia orgánica al mismo tiempo que la modifican, contribuyendo a la generación de vacíos. En el suelo bajo estudio, es propia de un típico suelo de pradera gramínea, que además, se halla bajo un monte implantado de álamos (*Populus*) de aproximadamente 15 años, con régimen údico. La bioturbación es intensa, ya sea por la fauna (excrementos y/o pasajes y pedotúbulos de fauna cavadora) y las raíces. Hay canales de raíces y de la fauna, los primeros tienen forma más perfecta, en cambio los

de animales son irregulares y con zonas de material comprimido en las paredes, resultante de su funcionamiento metabólico. Los pedorrasgos son excrementales.

Horizonte Bsst1 (sección tomada de 40 y 48 cm de profundidad). Posee microestructura en bloques subangulares donde los agregados están separados por vacíos planares cortos y caras de agregados acomodadas entre sí, también en bloques angulares con abundantes vacíos planares (Fig. 1c). Todo el material está atravesado por un marcado sistema de fisuras formado por procesos de expansión-contracción, y a veces combinado con la acción de las raíces que aprovechan el espacio poral existente o zonas de debilidad del material. Los vacíos planares son abundantes, como también los vacíos mamelonares y los canales de pasaje de la fauna. La fábrica de birrefringencia es estriada, principalmente poroestriada y granoestriada, por la abundancia de material fino (arcilla: 54%; limo: 39,2%; arena: 6,37%) (Fig. 1d). Un rasgo destacado es la masa basal heterogénea, de distintos tonos ya sea que se trate del material propio del horizonte (pardo a pardo oscuro, 7,5YR 4/2 en seco y pardo muy oscuro a pardo oscuro, 7,5YR 2,5/2, en húmedo), o del material húmico incorporado desde los horizontes superiores (pardo grisáceo oscuro, 10YR 4/2 en seco y negro, 10YR 2/1, en húmedo), a través de grietas por procesos de pedoturbación física.

Los pedorrasgos son: pedorrasgos de fábrica; escasos revestimientos texturales, finos y muy finos, birrefringentes y algunos casi continuos bordeando algunos poros en las zonas de mayor estabilidad interna del material del suelo (Fig. 1d), otros, inmersos en la masa basal podrían confundirse con la arcilla orientada de la misma; muy escasos nódulos sesquioxídicos, algunos fracturados. Los biorrasgos son abundantes, numerosos pedotúbulos crecientes semejantes los del horizonte A.

Horizonte Bsst2 (sección tomada de 50 y 58 cm de profundidad). Posee microestructura en bloques subangulares y angulares con abundantes vacíos planares finos y gruesos, algunos desordenados (Figs. 1e, f, g, h). Las fisuras planares gruesas y finas son más abundantes que en el horizonte superior, e indican desplazamiento diferencial de la masa del suelo, con formación de grietas abiertas durante el período de déficit hídrico y caída de material superficial, como en el horizonte superior, y abundantes fisuras finas de fractura. La fábrica de birrefringencia es fuertemente orientada, estriada por partes (Figs. 1e y 1g) y en partes puntual con abundante material fino (arcilla 48,1%; limo: 41,2%; arena: 10,9%). Se observan escasos y discontinuos revestimientos de arcilla birrefringente en vacíos (Fig. 1e). En cambio, la mayor parte del material fino está orientado tanto en la masa basal como en torno a fisuras formando pedorrasgos de fábrica resultantes de presión y deslizamiento del material durante los períodos de humedecimiento y expansión. Muy escasos revestimientos texturales, discontinuos en vacíos, aunque

algunos podrían confundirse con los rasgos de fábrica debido a la abundancia de componentes finos; hay escasa actividad biológica de animales y raíces y escasos nódulos sesquioxídicos. Los pedorrasgos son: abundantes de fábrica, muy escasos revestimientos texturales y escasos nódulos.

Argialbol típico

Horizonte A (sección tomada de 2 a 10 cm de profundidad). Se caracteriza por la estructura vermicular (Fig. 2a). Ésta es notable donde los agregados poseen laminaciones crecientes (Fig. 2a) y sistema poral con abundantes pasajes de la fauna conteniendo variadas cantidades de material fecal, posiblemente de lombrices (Fig. 2b). También presenta microestructura en bloques subangulares y redondeados con pedalidad moderada y separados por vacíos incompletos. El material fino es oscuro y casi isótropo. Los biovacíos son muy abundantes tanto de la fauna como de pasaje de raíces. En este último caso suele haber cámaras subredondeadas con raíces vivas desde donde se desprenden fisuras irregulares ocupadas por raíces más finas (Figs. 2c y d). La fábrica de birrefringencia es punteada. Los únicos rasgos pedológicos son biorrasgos.

Horizonte E (sección tomada de 18 a 28 cm de profundidad). Posee microestructura masiva atravesada por vacíos longitudinales desordenados, largos que atraviesan el material o cortos que se pierden en la matriz; algunas cavidades grandes poseen restos de raíces que se bifurcan en fisuras de menor tamaño. Se observan biorrasgos mamelonares aunque menos abundantes que en el horizonte A donde está concentrada la mayor actividad de la fauna. La fábrica de birrefringencia es punteada. Los rasgos pedológicos predominantes son los amorfos y criptocristalinos bajo la forma de nódulos de fuerte impregnación y límites definidos, de hasta 5 mm. No hay difusión de óxidos en la matriz lo que indica que la hidromorfia es moderada. Este horizonte presenta la peculiaridad de poseer escasos revestimientos texturales de arcilla, discontinuos en vacíos, son finos aunque excepcionalmente de 200 µm de espesor (Fig. 2e), pobremente laminados, de color anaranjado y birrefringentes (Fig. 2e). Algunos de los vacíos en la masa basal posiblemente están vinculados a bioturbación. Por definición los rasgos iluviales están ausentes en horizontes eluviales aunque ellos se han descrito en horizontes E y E/Bt (Kühn *et al.*, 2010).

Horizonte Bsst (sección tomada de 32 a 40 cm de profundidad). Presenta microestructura angular con fuerte grado de pedalidad, agregados angulares y cuneiformes separados por fisuras anchas y finas y fisuras finas que se pierden en la masa basal del suelo o formando sistemas entrecruzados desordenados y subparalelos (Figs. 2f y g). Hay vacíos irregulares grandes de raíces a partir de los que nacen

fisuras finas de fractura. La fisuración es muy intensa producida por pedoturbación por expansión/contracción y en menor medida por actividad de la fauna; ésta es mucho menos intensa que en el horizonte superior aunque hay canales alargados de la fauna y subparalelos de menor extensión que las fisuras. La masa basal es algo heterogénea por partes, con zonas más oscuras por hidromorfismo y disturbación física del material. La fábrica de birrefringencia es estriada, granoestriada y poroestriada. Presenta abundantes rasgos sesquioxídicos, nódulos y concreciones grandes de hasta 1,5 mm y pequeños, en general de menor tamaño que en el horizonte superior, muchos impregnativos irregulares; unos y otros denotan influencia hidromórfica más prolongada. Escasos revestimientos texturales de arcilla (Figs. 2f y g), birrefringentes moderadamente laminados, discontinuos y de espesor irregular, en vacíos redondeados y muy escasos inmersos en la masa basal.

En este suelo el grado de desecación y formación de grietas superficiales es menor que en el Argiudol vértico, posiblemente debido al mayor período de saturación, que a la vez favorece la movilización de fluidos en distintos sentidos y la mayor segregación de compuestos fácilmente reducibles por concentración puntual y por difusión y en la masa basal. Los procesos pedológicos más conspicuos son la pedoturbación física y el hidromorfismo.

Caso 2. Micromorfología de paleosuelos cuaternarios

En los acantilados costeros del centro-este de la provincia de Buenos Aires (entre los 38° 10' 9'' S y 38° 14' 21'' S y los 57° 38' 15'' O y 57° 45' 36'' O) afloran de forma continua y por más de 30 kilómetros, depósitos continentales del Plio-Pleistoceno en los que se identificaron diferentes tipos de paleosuelos. Estas sedimentitas corresponden a la Aloformación Punta San Andrés (Zárate, 1989) y fueron depositadas principalmente por sistemas fluviales mixtos, con predominio de carga en suspensión, aunque también se han identificado depósitos lacustres. Los afloramientos muestran entre 6 y 8 metros de arcilitas y limolitas de planicies de inundación y depósitos de areniscas asignadas al relleno de los canales. Se advierten paleosuelos compuestos, cálcicos y vérticos, desarrollados sobre las facies de planicie de inundación. La Aloformación Punta San Andrés presenta un arreglo de facies verticales superpuestas donde cada unidad tiene: nivel de paleosuelo, seguido por sedimentitas no pedogenizadas (probables horizontes C). Estos "ciclos" se encuentran repetidos verticalmente y cada uno de ellos tiene un espesor promedio de 2,5 metros. Los paleosuelos se clasifican según el esquema de Mack *et al.* (1993) como Calcisoles y Vertisoles en base a la presencia de pedorrasgos vérticos y calcáreos respectivamente. Los rasgos se asignan a todo el espesor del paleosuelo, sin identificación detallada de horizontes pedológicos aunque no se observaron horizontes A (Beilinson, 2011).

Los paleosuelos se identificaron en el campo según su potencia, tipo de contactos, estructura, color, textura al tacto, moteados, nódulos, etc. También se determinó la composición mineralógica y la intensidad de la bioturbación. Las distintas morfologías desarrolladas por el carbonato de calcio pedogénico fueron clasificadas según los estadios propuestos por Machette (1985). La característica más distintiva de los paleosuelos en el afloramiento es que forman cuerpos tabulares y continuos, de color castaño a blanquecino. Internamente, estos paleosuelos exhiben una variedad de arreglos en sus agregados que van desde estructura masiva hasta bloques subangulares y prismas. Los pedorrasgos más conspicuos en la unidad bajo estudio son los nódulos de carbonato de calcio individuales (Estadio II) y las calcretas fuertemente cementadas (Estadios IV, V y VI), tanto en Vertisoles como en Calcisoles.

Se encontró abundante fauna fósil vinculada a *Pamphtheriidae* (Xenarthra), *Eutatini* (Cingulata) y *Caviomorpha* (Rodentia), así como también abundante registro de la actividad de plantas e invertebrados. Allí donde estas últimas se preservan, el grado de bioturbación es de moderado a alto (*sensu* Taylor y Goldring, 1993). Las trazas fósiles identificadas son paleocuevas con y sin relleno sedimentario (diámetro aproximado 40 cm), rizolitos (2 cm de diámetro y entre 15 y 20 cm de largo), *Taenidiumserpentinum*, *Beaconitescoronus* *Castrichnusincolumis* (Beilinson y Taglioretti, 2013). Estas últimas icnoespecies se relacionan a la actividad de lombrices (Verde *et al.*, 2007).

Para complementar la interpretación paleoambiental realizada en base al análisis de las facies sedimentarias y de los elementos arquitecturales, se realizó un estudio micromorfológico de detalle. Se describieron los cortes delgados, siguiendo los parámetros propuestos por Bullock *et al.* (1985) y Stoops *et al.* (2010) con el fin de detallar los procesos pedológicos que tuvieron lugar.

Calcisoles. Los Calcisoles se encuentran muy bien representados en la Aformación Punta San Andrés. Conforman cuerpos tabulares, con una extensión lateral de varios kilómetros. En el techo de los mismos se presenta una superficie de erosión y disolución, que indica un proceso de truncación, mientras que el contacto inferior es gradacional. Es debido a esto que los Calcisoles presentan perfiles incompletos, donde el horizonte A del suelo no se preservó, o no es fácilmente identificable. Este tipo de paleosuelo se desarrolla en facies de areniscas finas a medianas o en areniscas limolíticas. Es interesante reparar en el hecho de que los Calcisoles siempre están en facies de granulometría más gruesa que los Vertisoles y con un contenido menor de arcilla.

Los rasgos macro y micromorfológicos indican que los Calcisoles están afectados por procesos de calcificación o carbonatación. Los principales rasgos micromorfológicos incluyen microfábricas alfa y beta y se describen a continuación:

Microfábrica alfa. En el presente trabajo se utilizan los conceptos de microfábrica alfa y beta establecidos por Wright (1990) para caracterizar a los horizontes cálcicos y petrocálcicos en suelos actuales y paleosuelos. Tal como son usados aquí también fueron utilizados por Bouza y del Valle (2014) para la caracterización de Aridisoles actuales en el centro-este de Chubut y en Molisoles por Blanco y Amiotti (2014). La microfábrica alfa se corresponde a la fábrica K de Gile *et al.*, (1965) y consiste en una masa basal homogénea rica en calcita, la cual presenta una fábrica-b cristalítica (*sensu* Stoops *et al.*, 2010). Se observan granos detríticos dispersos en la matriz, flotando en ella (Fig. 3a). El estudio micromorfológico también identificó la presencia de revestimientos de carbonato de calcio en las paredes de vacíos y granos con el desarrollo de láminas microesparíticas claras (Fig. 3b) y “pendants” compuestos por cristales microesparíticos bien desarrollados. También se observan parches de esparita irregularmente distribuidos, rellenando cualquier tipo de vacío (Fig. 3c).

Microfábrica beta. La microfábrica beta presenta una variedad de rasgos biogénicos, entre los cuales se pueden encontrar las costras laminares, los pisolitos, los granos recubiertos y la estructura alveolar septal. Las costras laminares son rasgos macroscópicos que muestran una laminación fina y densa ubicada cerca del tope del horizonte cálcico (Fig. 3d). Microscópicamente, se componen de una sucesión de láminas micríticas de coloraciones claras que alternan con bandas más oscuras (Fig. 3e). Otras características micromorfológicas de las microfábricas beta son los pisolitos (estructuras concéntricas, sin núcleo y con láminas de micrita castaña), los granos recubiertos (“*coatedgrains*”), la materia orgánica diseminada en la matriz, o estructuras indicadoras de la influencia microbiana en la precipitación de la calcita (e.g. estructura alveolar septal) (Fig. 3f).

Pedorrasgos cristalinos. Son frecuentes los nódulos calcíticos que suelen coalescer y formar un horizonte nodular (Estadio II-III).

Vertisoles. Los Vertisoles poseen buena expresión morfológica en relación a la naturaleza textural del sedimento, se desarrollan en los materiales más finos (arcilitas y limolitas) que los Calcisoles. Su extensión lateral excede los cientos de metros, aunque en forma discontinua por la incisión de canales fluviales.

Los Vertisoles presentan rasgos macro y micromorfológicos característicos de procesos de pedoturbación (vertisolización y bioturbación por la actividad de la fauna y la vegetación) y en menor medida hidromórficos y de iluviación. Los pedorrasgos macroscópicos identificados son: pseudo-anticlinales, grietas de desecación, estructura prismática y en bloques, superficies de deslizamiento (*slickensides*), y a veces nódulos carbonáticos. Las superficies de deslizamiento

ven en horizontes de color castaño rojizo (10R 5/4) y estructura en bloques gruesos (Fig. 4a).

Los rasgos micromorfológicos, que se describen en detalle a continuación, incluyen pedorrasgos de fábrica, texturales de arcilla y nódulos férricos. La bioturación es intensa, ya sea por la fauna como por las raíces. Las trazas fósiles identificadas son túneles atribuidos principalmente a *Taenidium serpentinum* (Beilinson y Taglioretti, 2013).

Pedorrasgos de fábrica. La distribución relativa de los gruesos/finos (*c/f-relatedistribution*) es de tipo porfirica. En correspondencia con las superficies de deslizamiento se identificaron zonas de birrefringencia elongadas correspondientes a fábrica-b estriada: poroestriada alrededor de vacíos planares y granoestriada alrededor de granos esqueléticos (Fig. 4b). Estos rasgos suelen coexistir con nódulos férricos y carbonáticos. La identificación micromorfológica de zonas con fábrica -b estriada en los mismos horizontes donde también se observan pseudo-anticlinales y grietas de desecación señalarían que la vertisolización fue el proceso pedológico preponderante en estos horizontes y se vinculan a la homogeneización del perfil por pedoturbación.

Pedorrasgos texturales de arcilla. Los revestimientos de arcilla se identifican en el microscopio pero no en el campo. Se encuentran en las paredes de los agregados, pero más frecuentemente en canales y macroporos vinculados a la actividad de raíces. Los revestimientos son microlaminados, continuos y límpidos, con extinción en bandas y sin quiebres o grietas (Figs. 4c-d). Estos revestimientos cubren completamente las paredes de los poros con un espesor constante (0,05-0,1 mm).

Si bien la presencia de revestimientos texturales de arcilla son pedorrasgos vinculados a iluviación, su presencia en los paleosuelos estudiados no es preponderante cuando se compara con la abundancia de los pedorrasgos de fábrica. Es por este motivo que se opta por clasificarlos como Vertisoles y no como Argilisoles.

Pedorrasgos amorfos. Nódulos férricos. Son cuerpos sub-esféricos compuestos por óxidos de hierro y manganeso, con un diámetro variable entre 0,2 a 0,5 mm y abundancia relativa entre 5% y 10%. Estos nódulos muestran una variedad de tipologías tales como: típica, concéntrica, nucleica y ameboidal (Fig. 4e). Estos pedorrasgos se encuentran vinculados a procesos hidromórficos, impregnativos, cuya participación fue escasa cuando se compara con los procesos de vertisolización.

Pedorrasgos cristalinos. Nódulos carbonáticos. Los nódulos carbonáticos son cuerpos sub-esféricos a oblados de carbonato de calcio con un diámetro que varía entre 0,1 y 0,15 cm. Su abundancia varía entre 10% y más del 60%. En los

Vertisoles, el estudio micromorfológico indica dos tipos de nódulos: el primero está caracterizado por agregados radiales o masas de cristales aciculares relleno de venas o reemplazando a la matriz original (Fig. 4f). El segundo tipo se caracteriza por un cemento micrítico masivo.

Mineralogía de las arcillas

Los minerales arcillosos contenidos en paleosuelos (Vertisoles y Calcisoles) de la Aloformación Punta San Andrés fueron analizados en diferentes localidades. Las especies identificadas incluyen illita, esmectita, coalinita, clorita, interestratificados de illita-esmectita, clorita-esmectita y caolinita esmectita. Las especies no argílicas en la fracción <4 µm, en orden decreciente de abundancia, son cuarzo, feldespatos, calcita y muy pequeños porcentajes de halita y sílice amorfa.

Caso 3. Micromorfología de mantos de meteorización

En este trabajo se aplican conceptos de micromorfología para caracterizar zonas del manto de meteorización con distinto grado de alteración. Se describe un perfil de meteorización truncado, desarrollado en granitos ordovícicos del basamento del Sistema de Famatina, Provincia de La Rioja, Argentina (29° 20' 47'' S, 67° 44' 46'' O). Este perfil, del que actualmente se encuentran sólo las partes basales, se habría generado por un proceso de meteorización bajo condiciones paleoclimáticas muy diferentes a las actuales, posiblemente de gran humedad y temperatura. El conjunto de procesos geológicos que actuaron al promediar y finalizar el Paleozoico intervinieron en la truncación del relieve famatiniano, en la configuración de una paleosuperficie de planación regional y posterior deposición de depósitos pérmicos. En escasos lugares del área se observan finos depósitos pérmicos sobreyaciendo en discontinuidad al perfil de meteorización, como en el caso descrito, donde posee un espesor aproximado de 0,50m y donde se desarrolla un Entisol.

El perfil de meteorización de la Formación Granito Ñuñorco sigue el siguiente patrón de base a techo: a) roca fresca, b) frente de meteorización, c) sectores medios a superiores del manto de meteorización. Posee un espesor aproximado de 3 a 3,5 m de potencia. La descripción se realiza macro y microscópicamente (Stoops *et al.*, 1979; Bullock *et al.*, 1985).

Roca fresca. Clasificación según QAPF (Streckeisen, 1974): Granito (Fig. 5a): Está atravesada por diques ácidos de composición aplítica (cuarzo-feldespato potásico) de escaso espesor y diques básicos gabro-dioríticos (plagioclasa y anfíbol) de mayor espesor y que no se encuentran en los depósitos pérmicos suprayacentes. Afectan al granito dos sistemas de diaclasas subverticales casi ortogonales que

se intersectan con otro sistema horizontal y favorecen la penetración de los fluidos responsables del proceso de meteorización; con el aumento del grado de meteorización las fracturas se ensanchan, profundizan y delimitan bloques de roca inalterada en el centro (“corestones”); la alteración actúa redondeando las aristas de estos bloques, a la vez que gradualmente reducen su tamaño.

Litológicamente corresponde a granitos y granodioritas. Se tratada rocas de textura granuda, equigranulares, con tamaño promedio de grano 4,5mm, de coloración gris-rosada. Se observan individuos anhedrales y subhedrales conformando una textura granuda subhedral, compuesta de: cuarzo (28%) de formas irregulares; plagioclasa(25%) de hábito tabular y maclado polisintético; microclino (30%) con hábito tabular y maclado de periclino; láminas de biotita (9%) y muscovita (5,5%) y minerales opacos en menor proporción. Los feldespatos son muy abundantes: feldespato potásico (microclino) y plagioclasa; cuando esta última es predominante respecto del feldespato potásico el tipo litológico corresponde a granodiorita, y viceversa en el caso del granito. Como rasgos de alteración en los feldespatos se observa ligero enturbiamiento superficial por argilominerales. La roca presenta abundantes microfracturas. En los minerales constituyentes del granito la alteración se manifiesta según el siguiente orden: plagioclasa > biotita > feldespato potásico > muscovita > cuarzo.

Frente de meteorización (muy escasamente meteorizado). Se encuentra en la base del manto de meteorización y es un cuerpo donde comienzan a producirse transformaciones de los minerales primarios a minerales secundarios, sin destrucción de la estructura de la roca original, al igual que los diques aplíticos que conservan su textura y trayectoria original (sin desplazamiento). La determinación de los contactos basales de la alterita con la roca fresca infrayacente son difíciles de discernir puesto que visualmente no se observa contraste textural, y además este pasaje es marcadamente gradual. Son abundantes las fracturas así como restos de roca fresca muy redondeados “corestones” inmersos en la alterita, los cuales presentan coloraciones grises ligeramente enrojadas, respecto al entorno donde la rubefacción es total.

Niveles medios a superiores del manto de meteorización (moderada a altamente meteorizados). Se observan bandas de material arcilloso de color gris-blanquecino que se destacan en el material rojizo, además el material denota pérdida de coherencia, con comportamiento friable, que se desintegra al ser golpeado con el martillo.

En la zona moderadamente alterada se conserva la textura granuda original de la roca. De acuerdo a la estructura original conservada y las transformaciones minerales presentes, este sector del manto correspondería a la zona denominada *isalteritas* (Delvigne, 1998) y/o su equivalente a saprolito grosero (Nahon, 1986).

Un buen ejemplo de alteración del modelo lineal entrecruzado de grado 1 - 2 (Stoops *et al.*, 1979) lo constituye el microclino debido a la intersección de dos planos de maclas normales entre sí que delimita un núcleo de color blanquecino (menor alteración), contrastando con el cruce de los planos de macla con impregnaciones de óxidos y arcillas.

Las plagioclasas muestran alteración, a partir del centro del cristal y se extiende hacia los sectores periféricos siguiendo direcciones de los planos de clivaje, maclas y microfracturas (Fig. 5b). En individuos con zonación normal, las transformaciones se localizan en el interior del cristal (Fig. 5b). La biotita muestra arqueamiento y separación de sus láminas de exfoliación con incipiente ferruginización en los planos de clivaje. Los cristales de muscovita no presentan alteración visible. En el feldespato potásico (microclino), con su macla de periclino tipo enrejado, la alteración comienza por los planos de macla donde se observan minerales secundarios de arcilla. El cuarzo se observa límpido con delgadas microfracturas y textura consertal junto a feldespato potásico. Se presentan microfracturas intra-granulares, intergranulares y transgranulares, siendo más abundantes en este nivel y con mayor apertura (Figs. 5c-d).

En la zona altamente alterada o zona más superficial del manto, denominado *aloterita* (Delvigne, 1998) *sin* saprolito fino (Nahon, 1986), se observa una pérdida gradual de la fábrica original y se reconocen procesos de movilización y reorientación de matriz. Hacia la superficie se intensifica la alteración en las plagioclasas, comienza con un modelo lineal a través de direcciones cristalográficas y/o microfracturas hasta ser total. En ellas hay reemplazo pseudomórfico parcial a total por caolinita (grado 3, fuertemente y grado 4 completamente alterado, Stoops *et al.*, 1979), generando un material plasmático de meteorización pseudomorfo (alteroplasma). En cambio, los escasos cristales de muscovita sugieren un comportamiento más estable químicamente que biotita, mostrando —con luz polarizada— un anillo que rodea al cristal donde los colores de interferencia están notablemente modificados por transformaciones a hidromuscovita (sericita) con pasaje a caolinita (por pérdida de álcalis). Se destacan las transformaciones de biotita desde sus bordes, donde se separan sus láminas a modo de flecos o hilachas del cristal con un progresivo aumento de los óxidos de hierro y minerales opacos hasta la degradación total. Se forman lentes de minerales arcillosos intercalados en la apertura de sus láminas de exfoliación, no se reconocen las propiedades ópticas de la biotita, solo se observan óxidos de hierro y minerales arcillosos (caolinita). En pocos sectores se observan pasajes a agregados en acordeón de vermiculita. Los cristales de feldespato potásico están desdibujados con reemplazo total pseudomórfico de arcillas.

En este estadio de transformación integral de los feldespatos el único mineral primario que persiste es cuarzo rodeado por plasma arcilloso-ferruginosocolor pardo rojizo. Sus granos con diversos tamaños, domina el de arenas medias o

medio- gruesas (0,5- 1 mm), en menor cantidad, tamaños de arena fina y limo. Los de menor tamaño tienen bordes difusos y tránsitos graduales hacia la matriz donde están inmersos y no se observan contactos entre granos. Son notables los efectos de corrosión en los bordes de los granos de cuarzo donde se destacan engolfamientos (Fig. 5e) así como también en el interior de los cristales de cuarzo (Figs. 5f-g). El material fino arcilloso-ferruginoso está reorientado alrededor de los granos de cuarzo (fábrica de birrefringencia granoestriada) (Fig. 5h), y además revestimientos arcilloso-ferruginosos en fracturas.

Los núcleos de roca sin alterar (corestones) son los registros macroscópicos de la desagregación de la roca fresca, que cuando quedan en superficie forman "boulders y tors"; se los encuentra inmersos en el material meteorizado y varían en sus dimensiones desde el frente de meteorización hasta los niveles superiores; en el primero poseen grandes dimensiones con nulo o escaso redondeamiento, mientras que en los niveles superiores (10 a 20 cm) están intensamente alterados, con rasgos de disyunción por meteorización formados por capas concéntricas que rodean al núcleo, denominada meteorización esferoidal (Ollier, 1967). A escala microscópica estos clastos de roca están inmersos en una masa basal constituida por granos de tamaño arena muy gruesa a gruesa, de composición cuarzo feldespática y escaso material fino limo arcilloso que es producto de la alteración y disgregación del granito a lo largo de las fisuras inter e intragranulares, especialmente en las intersecciones de las mismas.

Consideraciones finales

La Micromorfología de suelos es una técnica que permite observar y comprender la evolución pedológica del material originario, a través de la observación microscópica de los rasgos específicos impresos en los horizontes por la acción del o los procesos pedológicos. Es de gran valor en estudios de génesis de suelos como también en aspectos aplicados pues permite observar y medir las relaciones entre la fase sólida y no sólida de los mismos. Asimismo, se aplica en ramas de la ciencia como Arqueología y Geología del Cuaternario, entre otras.

Haciendo una síntesis de los casos presentados surge que, en el caso de los suelos actuales, se puede establecer una diferencia del grado de influencia de los procesos pedogénicos en cada uno de los suelos. La parte superior del solum de ambos suelos muestra rasgos macro y micropedológicos característicos de procesos de pedoturbación, (vertisolización por la naturaleza granulométrica y mineralógica del material y bioturbación por la actividad de la fauna y la vegetación), hidromorfismo y escasamente de ilimerización.

En el Argiudol vértico los pedorrasgos destacables son: en el horizonte A los biorrasgos y biovacíos; en el Bsst1: la heterogeneidad de la matriz, los vacíos pla-

nares generados físicamente y la actividad de la fauna; en el Bsst2: la heterogeneidad de la matriz, los vacíos planares generados físicamente. En el Argialbol los pedorrasgos destacables son: en el horizonte A los biorrasgos y biovacíos; en el E: los vacíos planares generados físicamente y en menor medida por la fauna y los rasgos hidromórficos; en el Bsst2: los vacíos planares generados físicamente y los rasgos hidromórficos.

La posición catenaria alta en el Argiudol vértico, genera mayor espesor del horizonte A, con fuerte grado de melanización indicada por la masa basal casi isotropa, como también la intensa actividad biológica y de vegetales con buen grado de humificación. Los horizontes iluviales muestran intensa actividad física ante los cambios del contenido de humedad a través de la masa basal heterogénea y la fábrica orientada. En cambio el Argialbol, ubicado en posición catenaria baja posee mayor actividad de la fauna por la característica estructura vermicular y los rasgos redoximórficos autógenos en concentraciones localizadas y difusas en la masa basal, indicando drenaje interno deficiente.

En el caso de los paleosuelos plio-pleistocenos, la disposición superpuesta e independiente de Vertisoles y Calcisoles en el afloramiento indica que se trataría de paleosuelos compuestos (Fedoroff *et al.*, 2010). Debido a la naturaleza fuertemente erosiva del ambiente depositacional donde estos paleosuelos se desarrollaron, el horizonte más superficial no se reconoció en ninguno de los perfiles analizados

Los Vertisoles presentan rasgos macro y micromorfológicos característicos de procesos de pedoturbación (vertisolización y bioturbación por la actividad de la fauna y la vegetación) y en menor medida hidromórficos e iluviales. Los pedorrasgos identificados se asignaron al conjunto de todo el espesor del paleosuelo. En los Vertisoles los pedorrasgos destacables son la fábrica estriada, los vacíos planares generados físicamente, la actividad de la fauna y los nódulos de sesquióxidos. Las trazas fósiles, asignadas a la actividad de lombrices (Verde *et al.*, 2007), señalarían el régimen sub-húmedo a húmedo y la marcada estacionalidad del clima bajo el cual se desarrollaron estos paleosuelos.

Los Calcisoles presentan rasgos macro y micromorfológicos vinculados a la precipitación pedológica de carbonato de calcio (carbonatación) y en menor medida a procesos iluviales. Los pedorrasgos más destacables durante el análisis micromorfológico son las microfábricas alfa y beta, las cuales señalan la preponderancia de la actividad geoquímica o bioquímica en diferentes estadios de la evolución de estos paleosuelos.

Se ha establecido una relación directa entre la granulometría del depósito original y el tipo de paleosuelo desarrollado: se verifica en todos los casos que los Calcisoles se desarrollan en el material más grueso (areniscas) y los Vertisoles en el material más fino (limolitas arcillosas). La composición de la fracción <4 µm de los dos tipos de paleosuelos es muy similar cualitativamente, mostrando

diferencias en el contenido de esmectita, el cual es más abundante en los Vertisoles (34% vs. 24% promedio). Esto podría explicar los procesos de pedoturbación y los pedorrasgos de fábrica en ellos identificados. También se observan diferencias en el contenido de illita, siendo ésta más abundante en los Calcisoles (77% vs. 60% promedio).

En el caso de estudio del perfil de meteorización, se muestra un patrón común en su desarrollo, y de base a techo se reconoce: la roca fresca y un manto de meteorización. Regionalmente, la roca granítica fresca y alterada constituye distintas formas de relieve granítico antiguo, entre ellos una paleosuperficie de planación regional.

Los diferentes estadios en la evolución del perfil señalan importante fracturación del material original, acentuada meteorización con transformaciones pseudomórficas de plagioclasas y feldespato alcalino (ortosa-microclino), mientras que biotita sigue un patrón de alteración de distintos grados vinculados a sus direcciones de clivaje. Dentro de la alterita, se destaca un nivel inferior donde la roca meteorizada conserva la fábrica de la roca original (isalterita); hacia niveles superiores hay una pérdida gradual de la fábrica original y se reconocen procesos de movilización y reorientación de matriz (alloterita). En tránsito hacia estos niveles el cuarzo, mineral muy abundante a lo largo de todo el perfil, experimenta importante fracturación y corrosión con la consecuente disminución granulométrica siendo el único mineral primario que se conserva en la zona de mayor alteración.

El análisis micromorfológico permitió identificar al manto de meteorización como una capa de alteración superficial desarrollada directamente sobre el basamento granítico, e interpretar las variaciones en el grado de alteración de los minerales en el saprolito, desde la roca original inalterada hasta la fuertemente alterada.

Lista de figuras y tablas

Figura 1. Rasgos micromorfológicos del Argiudolvértico. Horizonte A (4,6% MO; 23,7% arc.): a) sección transversal de raíz con estructura celular visible en un vacío redondeado; vacíos irregulares interconectados; en parte inferior izquierda estructura migajosa con agregados redondeados; b) microestructura granular a esponjosa con agregados subredondeados, débil a moderadamente separados con variados y abundantes biovacíos: mamelonares, cámaras y canales finos.

Horizonte Bsst1 (1,51% MO; 54,4% arc.): c) agregados angulares y subangulares; abundante fracción gruesa tamaño limo; matriz heterogénea donde se ven áreas oscuras de material incorporado por pedoturbación, abundantes vacíos: cámaras redondeadas aisladas, otras interconectadas desde las cuales se desprenden vacíos alargados finos, intensa fracturación indicada por fracturas largas que atraviesan el material; d) Abundante fracción gruesa cuarzo-feldespática limosa; fábrica de birrefringencia punteada. Vacíos grandes interconectados rodeados por revestimientos texturales de arcilla, muy finos, discontinuos y birrefringentes; nódulo sesquioxídicoimpregnativo.

Horizonte Bsst2 (1,02%MO; 48,1% arc.): e) Microestructura angular; vacíos irregulares grandes y sistema fisural fino interconectado; fábrica de birrefringencia estriada y moteada; masa basal fina muy abundante; revestimiento textural de arcilla discontinuo en la parte superior izquierda de vacío;

f) Similar a la anterior donde se ven claramente los biovacíos anchos a la izquierda y fisuras finas subverticales; g) Detalle de e) donde se aprecian pedorrasgos de fábrica (zonas birrefringentes de arcilla orientada subparalelas) en torno a vacíos alargados siguiendo la dirección de deformación; h) vacíos desordenados atravesando la masa basal rodeando agregados angulares y subangulares.. Fotomicrografías con nicols cruzados: d, e, g.

Figura 1.- Imbellone et al. 2014

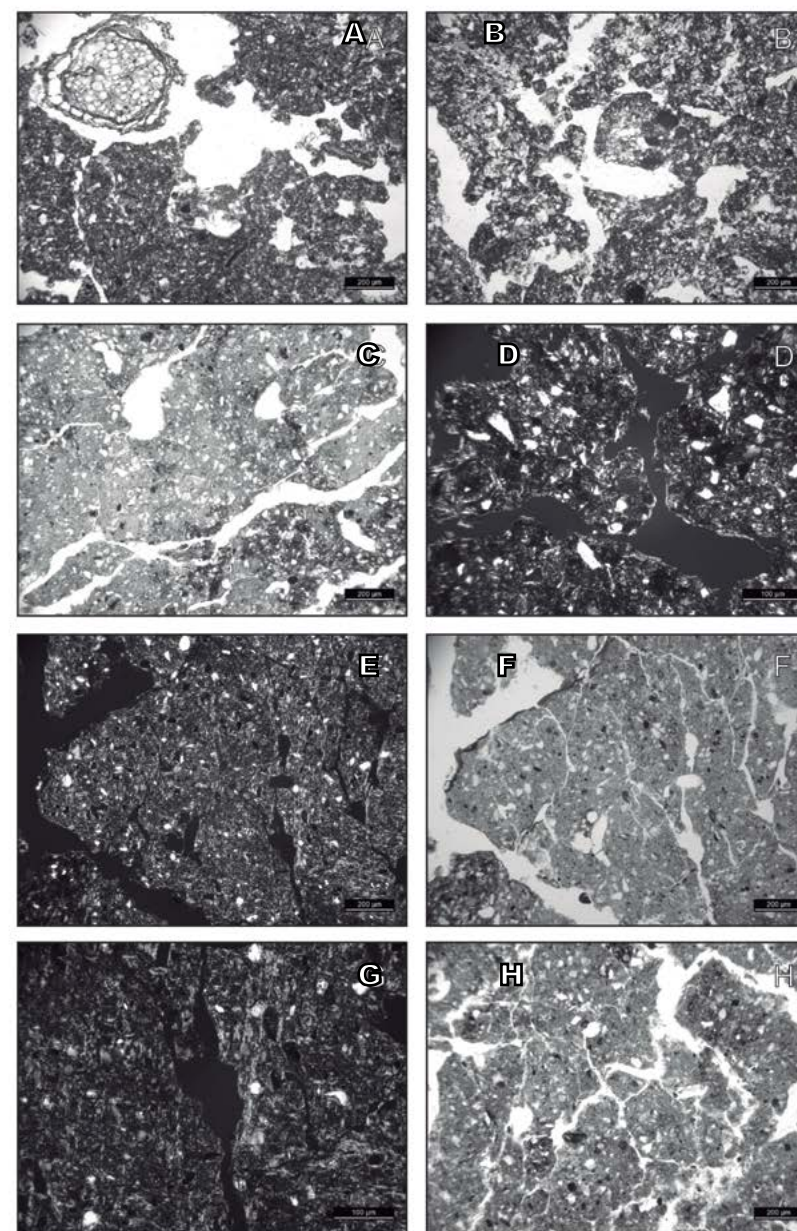


Figura 2. Rasgos micromorfológicos del Argialbol típico. Sin analizador. Horizonte A (3,48 % MO; 26,8 % arc.): a) estructura vermicular con pedorrasgo de fábrica donde se ve un ordenamiento de la masa basal en forma creciente, arqueada, proveniente de la actividad de la fauna; b) cámara con microagregados excrementales muy porosos, irregulares, humificados, posiblemente de lombrices; c) sección transversal de raíz con estructura celular visible, en una cavidad redondeada; d) vacío alargado grueso ocupado por una raíz y sección longitudinal de una raíz fina en un vacío.

Horizonte E (1 % MO; 26,3% arc.): e) masa basal oscura con vacíos mamelonares aislados; revestimiento textural arcilloso discontinuo en vacío, de espesor variable.

Horizonte Bsst(0,83 % MO; 62,4% arc.): f) sistema de fisuras finas separando agregados angulares y subangulares; masa basal heterogénea; cámaras y pasajes de la fauna donde se observan restos de deyecciones en la cámara central; revestimientos texturales atravesados por fracturas e inmersos en la masa basal; g) sistema de fisuras finas separando agregados angulares y subangulares, y fracturando revestimientos texturales de arcilla; h) nódulos y concreciones con fuerte impregnación irregular afectadas por fracturas internas y perisféricas.

Figura 2.- Imbellone et al. 2014

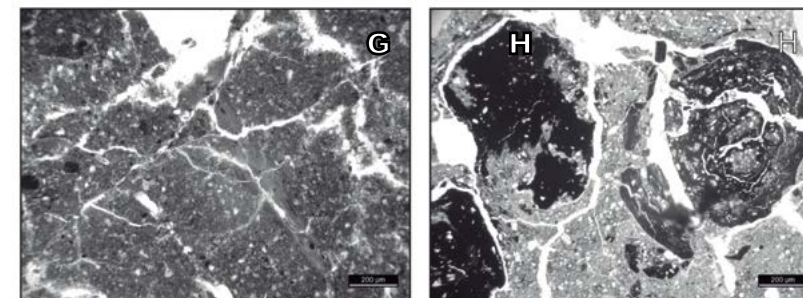
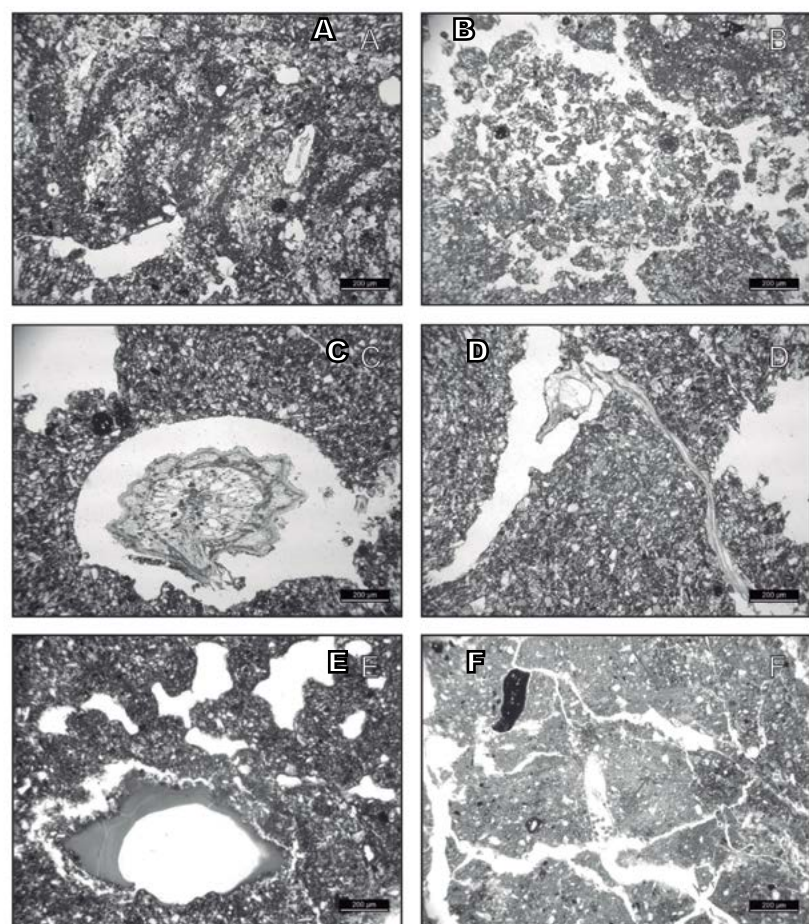


Figura 3. Rasgos macro y micromorfológicos de los Calcisoles de la Aloformación Punta San Andrés. Microfábrica alfa: a) masa basal homogénea rica en calcita, presenta una fábrica-b cristalítica. Se observan granos detríticos dispersos en masa basal; b) revestimientos de carbonato de calcio en las paredes de vacíos y granos con el desarrollo de láminas microesparíticas claras; c) parches de esparita irregularmente distribuidos, rellenando vacíos. Microfábrica beta: d) Pedorrasgo macroscópico: costura laminar con laminación fina y densa ubicada cerca del tope del horizonte cálcico; e) Pedorrasgo microscópico: láminas micríticas de coloraciones claras que alternan con bandas más oscuras; f) estructura alveolar septal: indica la influencia microbiana en la precipitación de la calcita.

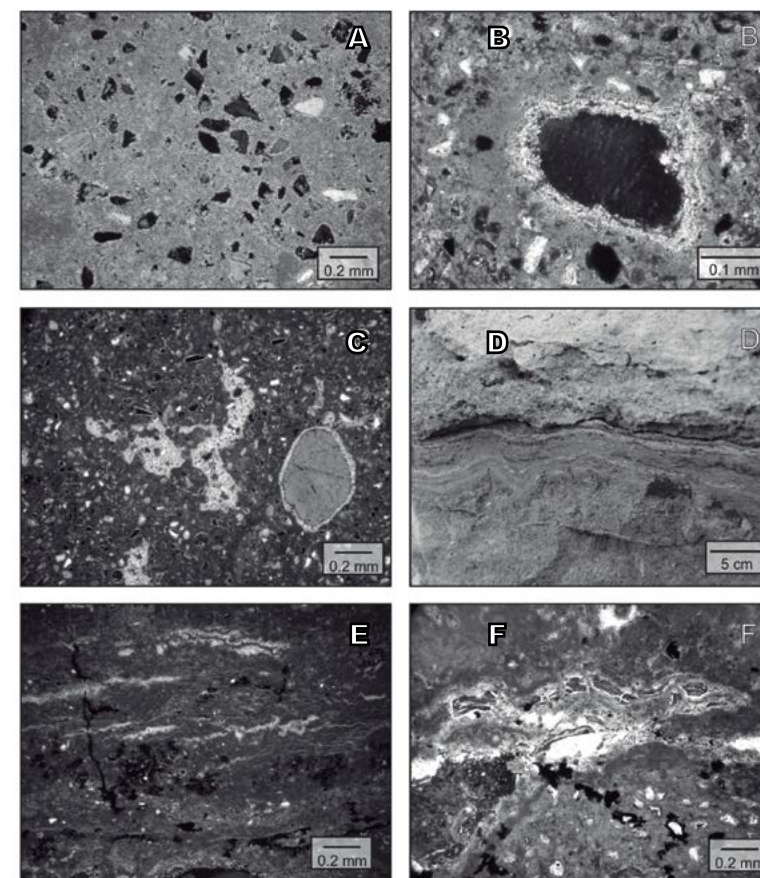


Figura 4. Rasgos macro y micromorfológicos de los Vertisoles de la Aloformación Punta San Andrés. a) Superficies de deslizamiento; b) zonas de birrefringencia elongadas correspondientes a fábrica-b estriada: poroestriada alrededor de vacíos planares y granoestriada alrededor de granos esqueléticos; c-d) revestimientos de arcilla en las paredes de los agregados, en canales y macroporos vinculados a la actividad de raicillas. Los revestimientos son microlaminados, continuos y límpidos, con extinción en bandas y sin quiebres o grietas; e) pedorrasgos amorfos: nódulos férricos; f) pedorrasgos cristalinos: nódulos carbonáticos caracterizados por agregados radiales o masas de cristales aciculares rellenando venas o reemplazando a la matriz original.

Figura 4.- Imbellone et al. 2014

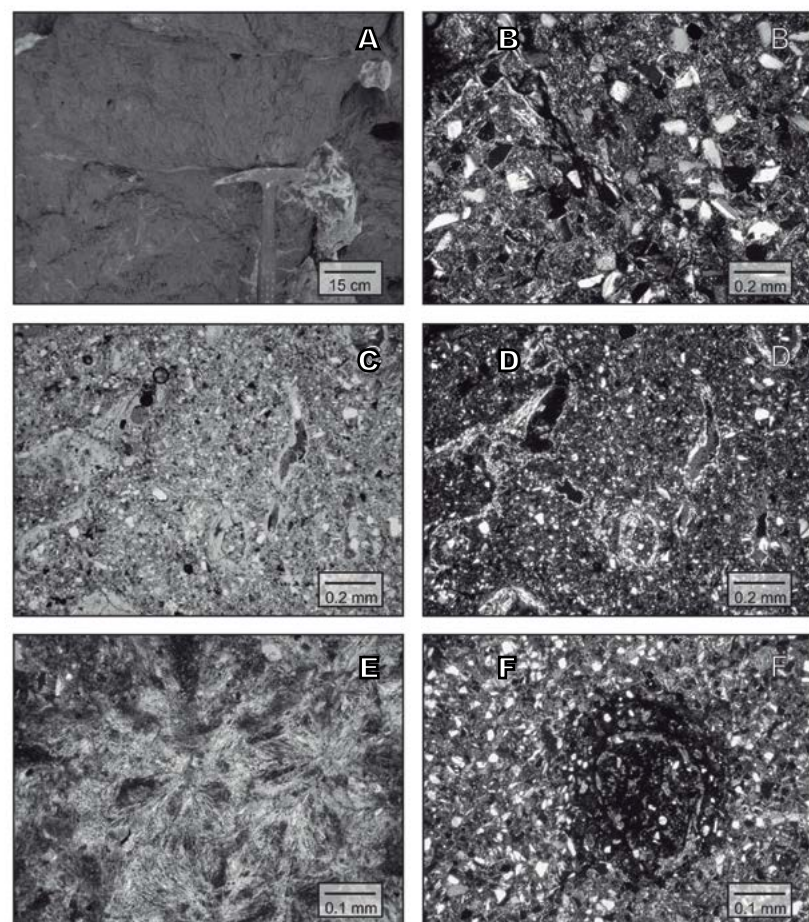


Figura 5. Rasgos micromorfológicos del manto de alteración. Roca Fresca: a) textura granuda con detalle de cristales fracturados (flechas) de biotita (coloreado) y plagioclasa; b) Zona moderadamente alterada: alteración diferencial en plagioclasazonada, reborde albítico (flechas) sin alterar y núcleo cálcico con alteración; c) Desarrollo de alteroplasma color rojizo, se destaca la fracturación de los cristales, conservando la textura de la roca original; d) En parte conserva estructura de la roca original con abundantes fracturas con revestimientos arcillo-ferruginosos; e) Zona fuertemente alterada: Granos de cuarzo muy fracturados con bordes de corrosión rodeado por material fino arcilloso-ferruginoso movilizado; f) corrosión interna y de bordes de granos de cuarzo, alteración interna y reemplazo por arcillas de los feldespatos; g) Detalle de grano de cuarzo atravesado por fracturas donde la corrosión avanza internamente y la matriz rojiza rodea y penetra los granos de mayor tamaño; h) material fino arcilloso-ferruginoso reorientado alrededor de los granos de cuarzo (fábrica de birrefringencia granoestriada). Fotomicrografías con nicols paralelos: c, d, g; Fotomicrografías con nicols cruzados: a, b, e, f y h.

Figura 5.- Imbellone et al. 2014

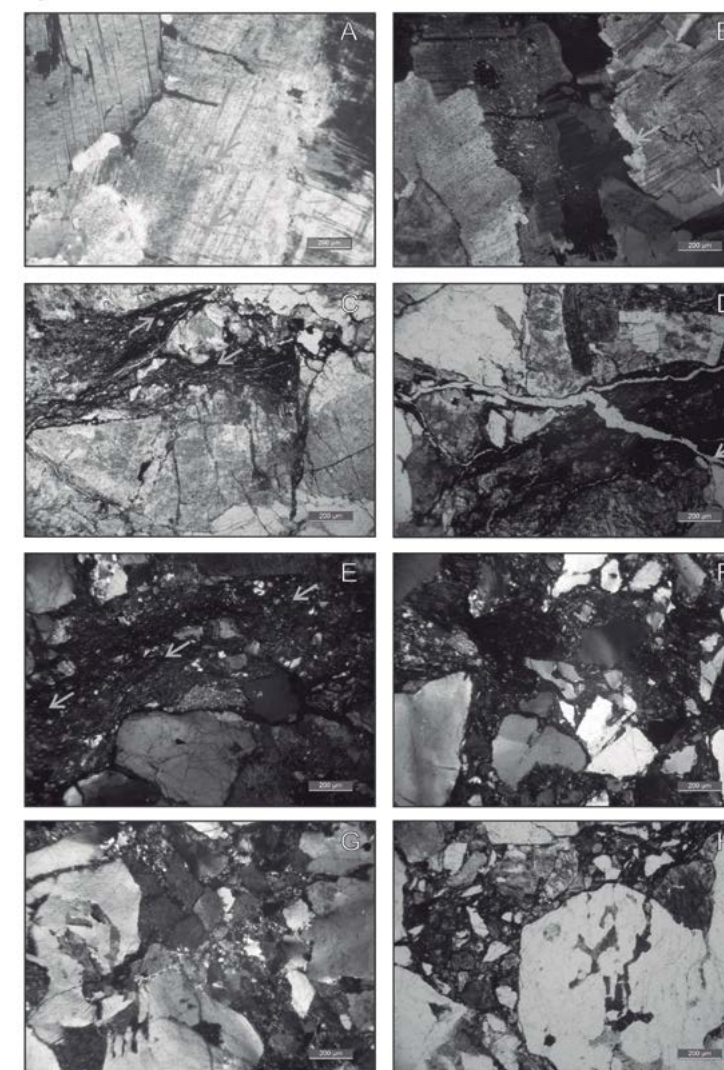


Tabla 1: Rasgos micromorfológicos del suelo (según Bullock *et al.*, 1985 y Stoops *et al.*, 2010).

MICROESTRUCTURA (Componentes)	GRUESO Y FINO (c/f): Relaciones	COMPONENTES BÁSICOS	MASA BASAL (fábrica-b)	PEDORASGOS	
				Tipos	
Tipo de agregado	Migajoso	Mónica	Componentes minerales	Indiferenciada	Revestimientos
	Granular			Cristalítica	Texturales
	Bloques subangulares	Gefúrica	Componentes orgánicos	Estríada (poroestríada, granoestríada)	Costras
	Bloques angulares				Rellenos
	Laminar	Chitónica	Artefactos	De pérdida	Halos
Prismático			Moteada		
Grado de pedialidad	Débilmente desarrollado	Enáulica			Revestimientos
	Moderadamente desarrollado	Porfírica		Espesor	Rellenos
	Fuertemente desarrollado		Continuidad	Cristalinos	Intercrecimientos
Tipo de vacíos	De empaquetamiento			Tamaño	Nódulos
	Vesículas			Orientación	
	Canales y cámaras			Diseño (reticulado, paralelo, circular, monoestríado)	Revestimientos
	Planos				Amorfos y cripto-cristalinos
					Nódulos
				De fábrica	Superficies de deslizamiento
					Excrementales

Tabla 2: Rasgos micromorfológicos de suelos actuales.

RASGOS MACROMORFOLÓGICOS		RASGOS MICROMORFOLÓGICOS	
<i>Argludol vértico</i>	<i>Arglialbol típico</i>	<i>Argludol vértico</i>	<i>Arglialbol típico</i>
<p>A. 0-29 cm; pardo grisáceo oscuro a pardo grisáceo (10YR 4,5/2) en seco y negro (10YR 2/1) en húmedo; franco limoso; migajosa-granular; ligeramente duro, friable, ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; raíces abundantes; límite claro y plano.</p>	<p>A. 0-18 cm; pardo oscuro a pardo (10YR 4/3) en seco y pardo muy oscuro (10YR 2/3) en húmedo; franco limoso; bloques subangulares, medios, moderados; duro, friable, plástico y adhesivo; raíces abundantes; límite neto y plano.</p>	<p>A. 0-29 cm; microestructura esponjosa y migajosa; biovacíos abundantes: cavidades mamelonares, interconectados o no, canales y cámaras de fauna y plantas, a veces con raíces vivas en el interior; fábrica de birrefringencia punteada; pedorasgos excrementales abundantes, pedotúbulos. Proceso dominante: pedoturbación (bioturbación); melanización.</p>	<p>A. 0-18 cm; microestructura vermicular y bloques subangulares y redondeados; biovacíos muy abundantes, cavidades mamelonares, y fisuras irregulares con secciones transversales y longitudinales de raíces vivas; pedorasgos excrementales abundantes, pedotúbulos. Proceso dominante: pedoturbación (bioturbación); melanización.</p>
<p>Btss1. 37-57 cm; pardo a pardo oscuro (7,5YR 4/2) en seco y pardo muy oscuro a pardo oscuro (7,5YR 2,5/2) en húmedo; arcilloso, bloques angulares medios, fuertes; muy duro, muy firme, muy plástico, muy adhesivo; barnices arcillo-húmicos, abundantes; superficies de deslizamiento comunes; chorreaduras de materia orgánica; raíces escasas; límite claro y plano.</p>	<p>E. 18-28 cm; (10YR 7/2) en seco y pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; franco limoso; masivo; muy friable; ligeramente, plástico y ligeramente adhesivo; concreciones de hierro-manganeso abundantes; moteados comunes, finos y precisos; húmedo; raíces comunes; límite neto y plano.</p>	<p>*Bsst1. 37-57 cm; microestructura bloques angulares; vacíos planares y mamelonares; biovacíos abundantes, cámaras y canales de pasaje de la fauna; fábrica de birrefringencia estríada; matriz heterogénea; pedorasgos excrementales y de fábrica abundantes, texturales muy escasos, amorfos escasos. Proceso dominante: pedoturbación (bioturbación y argiliturbación).</p>	<p>E. 18-28 cm; microestructura masiva, fisuras planares desordenadas; cámaras y pasajes de la fauna escasos; fábrica de birrefringencia punteada; rasgos pedológicos predominantes amorfos y criptocristalinos (nódulos y concreciones discretas); revestimientos texturales escasos. Proceso dominante: hidromorfismo.</p>
<p>Btss2. 57-88 cm; pardo (7,5YR 4,5/4) en seco y pardo oscuro (7,5YR 3,5/2) en húmedo; arcilloso; prismas regulares medios, fuertes que rompen a bloques angulares cuneiformes, medios, fuertes; muy duro, muy firme, muy plástico, muy adhesivo; barnices de arcilla abundantes y espesos; superficies de deslizamiento abundantes; chorreaduras de materia orgánica; moteados comunes, finos y precisos; raíces escasas.</p>	<p>Btss1. 28-53 cm; pardo (7,5YR 4,5/3) en seco y pardo oscuro (7,5YR 3/3) en húmedo; arcilloso; prismas, medios, moderados; muy duro, firme, muy plástico y muy adhesivo; concreciones de hierro-manganeso comunes; barnices arcillo-húmicos abundantes, espesos y continuos; superficies de deslizamiento comunes; moteados escasos, finos y precisos; raíces comunes; límite claro y plano.</p>	<p>*Bsst2. 57-88 cm; a bloques angulares cuneiformes y subangulares; vacíos planares muy abundantes, biovacíos escasos; fábrica de birrefringencia estríada; masa basal muy heterogénea; pedorasgos de fábrica muy abundantes, texturales escasos, amorfos escasos. Proceso dominante: pedoturbación (argiliturbación).</p>	<p>*Bsst. 28-53 cm; microestructura angular con fuerte pedialidad. Vacíos longitudinales irregulares y fisuras gruesas y finas angulares y desordenadas; más escasos son los canales longitudinales de la fauna y cavidades mamelonares; masa basal algo heterogénea por hidromorfismo y mezcla física; pedorasgos de fábrica abundantes; hidromórficos abundantes nódulos y difusiones en la masa basal; revestimientos texturales escasos en vacíos y en la masa basal. Proceso dominante: hidromorfismo y argiliturbación.</p>