



Capítulo 3

“Líneas de piedra” en suelos del noreste argentino. Origen e implicancias

“Stone lines” in soils from Northeastern Argentina. Origin and implications



^{*}
Lucas Martín Moretti
moretti.lucas@inta.gob.ar

Héctor José María Morrás

** Autor de contacto*

^{*} INTA-EEA Cerro Azul. Ruta Nacional 14, Km 836. (3313) Cerro Azul, Provincia de Misiones.

ÍNDICE CAPÍTULO 3

■ RESUMEN.....	91
■ EXTENDED ABSTRACT	92
■ INTRODUCCIÓN.....	94
■ GÉNESIS DE LAS LÍNEAS DE PIEDRA. HIPÓTESIS PROPUESTAS	95
■ MORFOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS CON LÍNEAS DE PIEDRA.....	98
Descripción morfológica. Notaciones propuestas.....	98
Las líneas de piedra y los sistemas de clasificación de suelos	101
■ LAS LÍNEAS DE PIEDRA DEL NORESTE ARGENTINO.....	101
Origen, composición y morfología de las líneas de piedra en los suelos rojos	103
Yacencia y distribución de los horizontes nodulares y silíceos.....	110
■ IMPLICANCIAS DE LAS LÍNEAS DE PIEDRA EN LOS SUELOS	111
Los horizontes pedregosos (nodulares y silíceos) como impedancia para el desarrollo vegetal	112
Implicancias de los horizontes pedregosos en la dinámica hídrica	113
Implicancias de los horizontes pedregosos en los procesos erosivos	115
■ CONSIDERACIONES FINALES.....	116
■ BIBLIOGRAFÍA.....	117

■ RESUMEN

Los suelos rojos del noreste argentino (Ultisoles, Oxisoles y Alfisoles) presentan frecuentemente capas “pedregosas”, usualmente conocidas como “líneas de piedra” en la literatura, y cuyo origen ha sido objeto de diversas interpretaciones. Para el caso de la provincia de Misiones, nuestros resultados nos han permitido diferenciar dos tipos principales de niveles pedregosos formados *in situ* como consecuencia de la meteorización del basalto, y que de acuerdo con su génesis y composición denominamos “horizontes de nódulos ferruginosos” y “horizontes silíceos”, ambos frecuentemente asociados a “horizontes estructurados en bloques”. En el primer caso los nódulos se formarían en las coladas de basalto masivo a partir de la caolinización de las plagioclasas, alteración los minerales ferromagnesianos y acumulación de un plasma ferruginoso, mientras que en el segundo, consistirían en venas relícticas de cuarzo heredadas del basalto vesicular y amigdaloides. Los horizontes estructurados se formarían a partir del desarrollo de una matriz arcillosa entre los nódulos a medida que éstos se van individualizando, o a partir de un “efecto de protección” ante el frente de meteorización que ejercerían los horizontes silíceos sobre los materiales de textura fina, subyacentes en el saprolito. Por otro lado, si bien no se cuenta con información suficiente acerca de las implicancias de estos horizontes en los suelos rojos de Misiones, se pueden realizar algunas estimaciones. En cuanto al desarrollo vegetal los horizontes nodulares constituirían un impedimento relativamente menor respecto de los silíceos para el crecimiento radicular. Además, en los perfiles suelen encontrarse varios horizontes silíceos superpuestos lo que incrementaría la restricción para la penetración de raíces. Respecto a la dinámica del agua debe tenerse en cuenta la profundidad, morfología, cantidad, espesor y composición de los horizontes pedregosos, siendo los nodulares más permeables que los silíceos. Vinculado con la influencia de estos horizontes en los flujos hídricos debe considerarse el eventual rol de los horizontes pedregosos en los procesos erosivos. En este sentido, dado la disminución de la permeabilidad que representan en particular los horizontes silíceos, estos podrían dar lugar a la circulación lateral hipodérmica del agua, a la generación de escurrimiento superficial, y eventualmente a la erosión del suelo. Si bien hasta el presente las “líneas de piedra” han sido localmente poco consideradas, el presente trabajo brinda una importante base de conocimiento acerca de su génesis y posibles implicancias en los suelos del noreste argentino.

Palabras clave

Génesis, horizontes nodulares,
horizontes silíceos,
impedancia,
erosión hídrica.

■ EXTENDED ABSTRACT

The dense layers of natural origin most known in Argentina, according to the predominant geological, geomorphological and edaphic characteristics of the country, are petrocalcic horizons and fragipans. However, the ferruginous and ferrallitic soils of the subtropical environment in the northeast of the country frequently present “stony layers”, whose presence and origin have not been sufficiently studied until now. These levels of accumulation of thick fragments -often of gravel size-, which are frequent in tropical and subtropical soils, have been called “stone lines” and their genesis is a controversial matter that has deserved numerous interpretations in the international literature. In this regard, the different hypotheses about the material composing this type of profile can be grouped into those that state that the material has autochthonous origin and those that state that it has allochthonous origin, although other more complex scenarios have also been postulated. The earliest studies referring to an allochthonous explanation describe two-stage processes: a first stage of deflation and surface exposure of pebbles, and a second one of burial of pebbles by sedimentation. On the other hand, the autochthonous models basically refer to processes of differential weathering and remobilization of materials within the profile, the latter as a consequence of gravity or promoted by the soil fauna. Several authors have also presented general explanations involving the simultaneous effect of different dynamic processes driven by gravity, water and biotic agents. In relation to these interpretations, diverse horizon nomenclatures, including the conventional ABC system and others, have been proposed for the morphological description of the soil. It is to be noted that most of the soil classification systems consider the stone line as a discordance. The red soils with stony horizons of northeastern Argentina (Provinces of Misiones and Corrientes), classified as Ultisols, Alfisols and Oxisols, have been traditionally considered to be the result of in situ weathering of the basaltic rock. However, in the 1990s, it was also postulated that the superficial material in which the red soils have developed is an eolian sediment (“Tropical loess”) of upper Pleistocene age, deflated from the alluvial plains of the Paraná and the Uruguay rivers. The main arguments supported by the authors who postulated this were the presence of a “stone line” -also assumed as sedimentary and constituted by siliceous platy-gravels- together with a structured level below it, which was interpreted as a paleosol. Conversely, on the basis of field observations of numerous profiles and detailed studies with a wide diversity of analytical techniques, we concluded that the parent material of the soils and the “stone lines” of northeastern Argentina and the associated blocky structured horizons are the result of in situ weathering of the basaltic rock. Therefore, we denominate these stony layers as “horizons” and identified two types of “stony horizons” in Misiones in relation to their origin, composition and morphology. The first is a “nodular ferruginous horizon”, more typical in the southern part of Misiones, composed mainly of hematitic and goethitic nodules of gravel size, and generally appearing at the soil-saprolite interface. Although its genesis needs to be studied in detail, the individualization of spheroidal fragments could be linked to the processes of “spheroidal weathering” -specifically mentioned for the massive basalts of Misiones- which would include a kaolinization of plagioclases, alteration of ferromagnesian minerals and a relative accumulation of a ferruginous plasma. The second one is a “siliceous horizon” of quartzitic nature, characterizing profiles in central Misiones. These silica concentrations are clearly in situ relicts of former hydrothermal quartz veins in the vesicular and amygdaloidal basalt flows. Concerning the “blocky structured horizons” below the stony horizons, field work and analytical data allowed concluding that they are not buried paleosols and that two processes may be responsible for the formation of these structured layers: 1) argilliplasmation together with ferrugination and development of iron nodules as a consequence

of weathering of massive basalt flows; in this case, the clayey matrix surrounding the nodules results in polyhedral aggregates differing from the microstructure in the solum which is mostly characterized by rounded peds; and 2) a “protective” effect exerted by the siliceous horizons against the weathering front, which allowed the development and conservation of structural blocky units from the fine textured materials in the saprolite underlying. On the other hand, the implications of the “stone lines” on the soil physical properties and landscape dynamics through their influence on the hydrological processes have been much less considered. Their impact on plant growth and soil quality from an agronomic point of view are varied and depend, among other factors, on the abundance, size, composition, degree of consolidation and depth at which the thick fragments are found in the profile. Regarding the role of nodular and siliceous horizons as impedance levels in the red soils of Misiones, it has been observed that the roots of tree plants or natural grasses abruptly change direction and develop horizontally in contact with the two types of stony horizons, while the proportion of roots decreases abruptly below them. In addition, according to their morphology and composition, it can be assumed that nodular horizons represent a relatively minor impediment compared with siliceous horizons. Regarding the water dynamics, the influence of the following four factors should be considered: 1) the depth of the stony horizon within the soil profile, which determines both the percolation and the amount of water stored; 2) the morphology of these horizons in terms of lateral development and thickness; 3) the type of horizon, because the nodular ones are more permeable, while the siliceous ones would be more restrictive for the vertical flow of water; and 4) the existence of several parallel stony horizons in the same profile, which introduces a great complexity on the retention and flow of water in the soil and consequently in their measurement. On the other hand, the presence of nodular horizons in the red soils of Misiones can be presumed to act as rock fragments, thus contributing to percolation and reducing the risk of erosion. A different situation would occur with the siliceous horizons due to their relative impermeability, although this will depend on their continuity, morphology and depth within the soil profile. Thus, although until recently the stony horizons in the northeastern part of Argentina have been ignored in pedological, geomorphological and agronomic research, the recent results and interpretations about their genesis and implications offer a new conceptual basement and suggest further deepening their study.

Keywords | Genesis, nodular horizons,
siliceous horizons,
impedance,
hydric erosion.

■ INTRODUCCIÓN

La existencia de capas densas en los perfiles de suelo, como las compactaciones derivadas de la actividad agrícola, o los niveles endurecidos de origen natural como los encostramientos calcáreos (o capas de “tosca”) constituyen restricciones con efectos directos e indirectos para el desarrollo de las raíces de las plantas, y en consecuencia considerados en el marco de la fertilidad física de los suelos (Taboada & Alvarez, 2008). No obstante, y desde una perspectiva más amplia, la modificación abrupta de la porosidad que implican esas capas antrópicas o genéticas pueden tener efectos ambientales importantes, relacionados por ejemplo con la circulación del agua y los procesos erosivos (Singer, 2006).

Entre las capas densas de origen natural más conocidas en nuestro país debido a las características geológicas, geomorfológicas y edáficas predominantes se encuentran por ejemplo las costras calcáreas (u horizontes petrocálicos) y los fragipanes (Taboada *et al.*, 2008). Sin embargo, en los suelos ferruginosos y ferralíticos de ambiente subtropical en las provincias de Misiones y Corrientes se presentan frecuentemente capas “pedregosas”, (conocidas en la literatura como “stone lines”) cuya mera presencia -y desde ya su génesis- no han recibido casi atención hasta ahora. Debe tenerse presente que en el estudio de estos suelos mediante excavaciones convencionales (calicatas) o sondeos verticales la aparición de estos niveles será descripta como un contacto lítico; de hecho, la identificación de estos materiales gruesos como un nivel discreto y diferenciado del saprolito o de la roca madre normalmente requiere ser efectuado en cortes verticales profundos del terreno como en rutas o canteras.

El término “línea de piedra” o “stone line” fue introducido en la década de 1930 en los estudios de suelo realizados en África por Milne (1936) y Sharpe (1938). Este último autor, propuso esa denominación para la acumulación de fragmentos angulares o subangulares provenientes de diques u otras capas resistentes paralelos a la pendiente superficial, producto de la reptación del suelo. Desde aquel entonces y hasta la actualidad, la interpretación acerca del origen y evolución de las líneas de piedra en los suelos ha sido objeto de numerosas contribuciones en la literatura internacional. En este sentido, el primer punto de discrepancia lo constituye la aloctonía o la autoctonía de los materiales que la componen. Por otro lado, dado que la “línea de piedra” sugiere una acumulación dinámica de los fragmentos gruesos y eventualmente una discordancia, la mayoría de las hipótesis planteadas hacen referencia a procesos de generación, movimiento interno o transporte y depositación de los fragmentos, difiriendo además en cuanto a la génesis de los materiales sobreyacentes.

La línea de piedra puede definirse como un nivel de acumulación de fragmentos gruesos, frecuentemente de tamaño grava, siendo un rasgo morfológico característico de muchos suelos de ambientes tropicales y subtropicales, aunque también se presentan en suelos de regiones templadas. Si bien este término ha sido utilizado tradicionalmente en la literatura, no consiste precisamente en una línea, sino más bien, en un cuerpo tridimensional de morfología planar. Por tal motivo, algunos autores objetan la expresión “línea de piedra” y adoptan otras como “*nappe de gravats*” (manto de gravas) (de Heinzelin, 1955), “*carpedolith*” (carpedolito o carpeta de piedras) (Parizek & Woodruff, 1957), “*stone layer*” (capa de piedra) (Stoops, 1989; Johnson *et al.*, 2005-a). Para el caso de las acumulaciones presentes en los suelos rojos de nuestro país -y como se desarrollará más adelante en este capítulo- se han propuesto también otras denominaciones relacionadas con su génesis, morfología y composición.

Si bien el origen de estas capas pedregosas ha merecido numerosos estudios, por el contrario, sus implicancias desde el punto de vista de las propiedades físicas de los suelos o en la dinámica del

paisaje a través de su influencia en los procesos hidrológicos han sido mucho menos consideradas. El rol de las líneas de piedra en estos aspectos agronómicos y ambientales será variado y dependerá entre otros factores de la abundancia, tamaño, composición, grado de consolidación y profundidad a la que se encuentren los fragmentos gruesos en el perfil.

El presente capítulo sintetiza los conocimientos obtenidos hasta el presente acerca del origen de las líneas de piedra y sus rasgos morfológicos característicos, así como sobre su posible influencia en las propiedades físicas, en la dinámica hídrica y en los procesos erosivos que afectan a una proporción importante de suelos del noreste del país.

■ GÉNESIS DE LAS LÍNEAS DE PIEDRA. HIPÓTESIS PROPUESTAS

Diferentes síntesis de los modelos propuestos acerca de la génesis de los suelos con líneas de piedra pueden encontrarse en los trabajos de Stoops (1967, 1989), Johnson & Balek (1991), Lanfranchi & Schwartz (1991), Ségalen (1969, 1994), Morrás *et al.* (2006; 2009), Schaetzl & Thompson (2015), entre otros.

Lanfranchi & Schwartz (1991) clasifican las hipótesis existentes en cinco tipos principales: a) hundimiento de elementos gruesos producto de la actividad biológica; b) hundimiento *in situ* por efecto de la gravedad; c) transporte lateral de materia por erosión y coluviamiento; d) meteorización química; e) procesos múltiples que combinan diferentes factores, por ejemplo, la sucesión de una fase de erosión seguida de la formación del recubrimiento producto de la actividad biológica. Por su parte, Ségalen (1994) así como Schaetzl & Thompson (2015) agrupan los procesos en cuatro categorías: 1) procesos de pediplanación relacionados a cambios climáticos resultando en la erosión de lateritas y venas de cuarzo, seguidas de un transporte de corta distancia de los fragmentos gruesos que son recubiertos por materiales finos procedentes de las mismas alteritas. Schaetzl & Thompson (2015) refieren principalmente para esta interpretación los trabajos de Ruhe definiendo la pedimentación en las superficies periglaciales erosionadas de Iowa; en este caso las piedras de los depósitos de till habrían quedado acumuladas ("*lag concentrates*") formando una "stone line" como consecuencia de los procesos erosivos. 2) procesos coluviales a lo largo de pendientes pronunciadas que provocan la erosión y transporte de fragmentos de capas endurecidas y venas; 3) origen autóctono con hundimiento *in situ* de lateritas endurecidas previamente fragmentadas por meteorización química. En este grupo Schaetzl & Thompson (2015) incluyen también la formación *in situ* de nódulos y concreciones. 4) bioturbación, donde la actividad de la fauna del suelo produce el movimiento descendente de las gravas en el perfil de suelo.

De esta manera los diferentes modelos propuestos se pueden dividir en "aloctonistas" y "autoc-tonistas" -según consideren que los materiales hayan sido transportados o generados *in situ*- o presenten un "origen múltiple", como resultado de la interacción de diferentes procesos específicos

Tabla 1

Los estudios más antiguos que hacen referencia a la aloctonía de los materiales comprenden dos etapas evolutivas, que consisten en la deflación y exposición de materiales gruesos, seguido por el desarrollo de una cobertura sedimentaria. En este sentido, Kellogg & Davol (1949) interpretaron a las líneas de piedra subsuperficiales en África como pavimentos de erosión, que posteriormente fueron cubiertos por sedimentos. Siguiendo este esquema que involucra procesos de erosión y sedimentación,

se encuentran las diferentes contribuciones de Ruhe y sus colaboradores (Ruhe & Cady, 1954; Ruhe, 1956; Ruhe & Daniels, 1958; Ruhe, 1959). En este caso, los autores proponen un modelo de pedimentación-pedosedimentación para explicar la génesis de estas acumulaciones tanto en suelos tropicales como en suelos de climas templados del Cuaternario. En tanto, Riquier (1969) señala que la línea de piedra está conformada por materiales gruesos, los cuales pueden ser de cuarzo, concreciones, fragmentos de roca, etc, y que se hallan enterrados por materiales más finos y homogéneos de origen coluvial.

Tabla 1: Diferentes hipótesis acerca del origen de las líneas de piedra en perfiles de suelo.

Table 1: Different hypotheses about the origin of stone lines in soil profiles.

Origen alóctono	Origen autóctono	Origen múltiple
Procesos de pediplanación-pedosedimentación (Ruhe & Cady, 1954)	Meteorización química: fragmentación y hundimiento <i>in situ</i> de lateritas (Laporte, 1962).	Escenarios que combinan procesos de erosión, sedimentación, meteorización, pedogénesis y actividad de la fauna (Johnson, 1993)
Coluviamiento a lo largo de pendientes pronunciadas (Stoops, 1967; Riquier, 1969)	Meteorización y transformaciones químicas y mineralógicas (Collinet, 1969; Lecomte, 1988).	
Deflación y exposición de materiales gruesos seguido por el desarrollo de una cobertura sedimentaria (Kellogg & Davol, 1949; Ruhe, 1956)	Meteorización diferencial de los materiales parentales (Stoops, 1967).	
	Actividad de la fauna que provoca el movimiento descendente de los materiales (Laporte, 1962)	
	Generación de nódulos de hierro residuales relacionados a uno o más ciclos pedogenéticos (Kaloga, 1976; Müller <i>et al.</i> 1981)	

Por otra parte, Lanfranchi & Schwartz (1991) involucran a la actividad biológica en la génesis de los materiales de los suelos de África central. En este caso, las líneas de piedra comprenden superficies de erosión desarrolladas bajo un clima seco y, posteriormente, cubiertas por sedimentos originados durante un clima más húmedo, bajo la acción conjunta del retrabajo biológico del material de suelo y el transporte lateral por efecto del agua a lo largo de las pendientes.

Por su parte, Brown *et al.* (2004) establecen el origen sedimentario de las líneas de piedras y de los suelos desarrollados en numerosos perfiles de Uganda, mediante análisis estadísticos, geoquímicos y morfológicos. Los autores señalan que los resultados analíticos obtenidos no pueden ser explicados mediante procesos de bioturbación debido a: a) la débil conexión entre el espesor y la profundidad de la línea de piedra; b) la profundidad variable a la que se encuentra la línea de piedra, con una relación inversa entre su profundidad y el máximo contenido de gravas; c) la presencia conjunta de fragmentos redondeados e inalterados con otros angulares de cuarzo bien meteorizados, en una línea de piedra que yace sobre el saprolito, y d) una diferencia geoquímica estadísticamente significativa entre el suelo y el saprolito, con evidencias de un manto superior menos meteorizado sobre un saprolito que ha sufrido procesos de meteorización más intensos.

En lo que respecta al origen autóctono de las líneas de piedra, los primeros trabajos vinculaban la actividad de la fauna como agente de reorganización de los materiales dentro del mismo perfil. De Heinzelin (1955) fue el primer autor en postular que la formación de la denominada “capa de gravas” en distintos suelos de África, se debe al transporte vertical del material proveniente del saprolito por las termitas. Este proceso resulta en la concentración de partículas más finas por encima de otras más gruesas dentro del perfil de suelo. También Lévêque (1969; 1970), en base a análisis geoquímicos y mineralógicos realizados en distintas toposecuencias en Togo, interpreta que la mayor parte de las concreciones encontradas en los suelos, e incluso en los horizontes C, son de carácter residual y han sido originadas por uno o más ciclos pedogenéticos antiguos, mientras que el material fino superficial habría sido acumulado por la actividad de las termitas. Por su parte, Laporte (1962) demostró la estricta correlación que existía entre el suelo y el basamento rocoso; no obstante, considera que la acumulación de las gravas en una línea de piedras se produce por translocación desde la parte superior del perfil, ya sea por bioturbación o por causas físicas. Por otro lado, Stoops (1967; 1989) también propone un origen autóctono para la parte inferior de las “capas de piedras” de algunos suelos de África central. Define a las “capas de piedras complejas”, en donde el nivel superior o $\beta 1$ es de origen sedimentario y está conformada por fragmentos de saprolito, restos arqueológicos, etc, mientras que la inferior o $\beta 2$ es detrítica y se compone únicamente de fragmentos derivados del perfil, ya sea aquellos generados por endurecimiento selectivo de algunas partes del material parental, como nódulos de hierro o de aquellos materiales más resistentes a la meteorización, como por ejemplo las venas de cuarzo. La cobertura superficial se originaría a partir de la mezcla de materiales alóctonos con otros de textura fina transportados por las termitas desde niveles más profundos.

A su vez, existen también algunos autores que interpretan la génesis de las líneas de piedra como el resultado de procesos de meteorización y profundización gradual del perfil (Collinet, 1969), o como producto del movimiento diferencial entre la matriz y los elementos gruesos del suelo (Lecomte, 1988). En este sentido, Kaloga (1976) diferenció tres tipos de materiales en los suelos de África occidental: a) gravas ferruginosas, formadas a partir de uno o más ciclos de meteorización intensos; b) esqueleto ferruginoso, originado bajo procesos de meteorización menos agresivos, y c) tierra fina, que se desarrollaría gracias a la permanencia de intensas condiciones de alteración. De esta manera establece que las gravas pueden tener dos orígenes: 1) “génesis alóctona y sitio autóctono”: donde las gravas son relictos de pedogénesis anteriores y permanecieron siempre en el mismo lugar, y 2) “génesis alóctona y sitio alóctono”: donde las gravas fueron depositadas por algún mecanismo de transporte. Conclusiones similares fueron obtenidas por Müller *et al.* (1981) en algunos suelos ferralíticos del Congo, quienes en base a estudios de detalle establecieron que los horizontes nodulares se originaron “*in situ*” mediante procesos de meteorización más antiguos, mientras que el horizonte superficial si bien es diferente macroscópicamente, está relacionado tanto mineralógica como estructuralmente al horizonte nodular subyacente. También Chauvel *et al.* (1983), describen el carácter autóctono de una capa nodular en un suelo sobre sedimentos terciarios en la cuenca del Amazonas. La destrucción de los nódulos en la parte superior del perfil contribuiría a la matriz arcillosa del horizonte B que se formaría sobre la capa nodular. Por último, De Oliveira *et al.* (1998) atribuyen una génesis autóctona a los latosolos y líneas de piedra desarrolladas tanto en el sector norte como el sur de la Cuenca del Paraná, Brasil. Los autores describen la presencia de nódulos de composición hematítica y goethítica, interpretando que los primeros se originarían a partir del reemplazo progresivo de la caolinita por Al-hematita, mientras los segundos lo harían por la intensa

extracción de sílice y elementos asociados. Además, señalan que la ausencia de líneas de piedra podría deberse a la carencia de elementos insolubles en los perfiles de meteorización.

Posteriormente, los trabajos de Braucher *et al.* (1998-a; 1998-b; 2004) abordaron el estudio genético de las líneas de piedra en lateritas mediante la determinación del ^{10}Be cosmogénico producido *in situ* en los retículos cristalinos de fragmentos de cuarzo. En los distintos perfiles analizados en Brasil, concluyeron que éstas se habrían originado a partir de procesos significativamente diferentes. En un primer caso donde la línea de piedra está conectada a una vena masiva de cuarzo, se produce un incremento en la concentración de ^{10}Be a medida que aumenta la distancia a la vena, sugiriendo que los fragmentos rocosos fueron acumulando continuamente ^{10}Be en su migración desde el área fuente, indicando así el carácter autóctono-parautóctono de la línea de piedra. Por el contrario, y en un segundo caso, las concentraciones de ^{10}Be medidas en gravas redondeadas de cuarzo son constantes a lo largo de la línea de piedras y muestran un exponencial decrecimiento con la profundidad, sugiriendo un emplazamiento rápido relacionado a un flujo en manto, seguido por depósitos coluviales del material laterítico meteorizado.

Por último, se han planteado escenarios más complejos donde se atribuye un origen múltiple a la formación de las líneas de piedra. En esta línea, Johnson & Balek (1991), Johnson (1993) y Johnson *et al.* (2005-a; 2005-b) introducen el concepto de la “Teoría de la Denudación Dinámica”, combinando diversos principios de la geomorfología, pedología e hidrología. Definen a la “capa de piedras” como un nivel compuesto de rocas cuarzosas, angulares a redondeadas, y/o ferricretes nodulares, derivado a partir de la acción simultánea de distintos procesos. Los autores consideran que las “capas de piedras” son de origen pedogenético y se desarrollan en un biomanto compuesto de dos niveles. De esta manera, la capa inferior podría resultar del movimiento descendente de las gravas por selección y transporte por parte de la fauna de grandes volúmenes de material fino desde niveles inferiores hacia la superficie.

Como surge de lo expuesto hasta aquí, muchos autores señalan que los suelos con líneas de piedra se formaron bajo condiciones climáticas fluctuantes. Algunos consideran procesos morfogenéticos en donde los fragmentos gruesos, ya sean residuales o redepositados, yacen sobre paleosuperficies cuaternarias y son cubiertos por materiales coluviales y/o transportados por las termitas desde niveles más profundos. Otros en cambio, sugieren que los cambios climáticos sólo producen reorganizaciones dentro de un mismo perfil, estableciendo el carácter autóctono de los elementos que lo componen. Por otro lado, existen algunos modelos que no contemplan cambios de índole climática para explicar la génesis de las líneas de piedra e involucran mecanismos de translocación de los materiales por bioturbación, meteorización química o gravedad.

Por otra parte, cabe destacar que la combinación de distintos procesos y factores en ambientes tropicales y subtropicales tienden hacia una convergencia morfológica, hecho que quizás haya provocado interpretaciones genéticas erróneas. Por lo tanto, todos los modelos propuestos sólo tienen validez local y no deberían ser generalizados ni extrapolados a otras regiones sin la realización de estudios previos de detalle en cada ambiente en particular.

■ MORFOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS CON LÍNEAS DE PIEDRA

Descripción morfológica. Notaciones propuestas

Relacionado con las diferentes hipótesis propuestas para la génesis de los suelos con líneas de piedra, existen también distintos criterios para la descripción morfológica de los perfiles. En este sentido,


Stoops (1967), Ségalen (1994) y Tandarich *et al.* (2002) entre otros, resumen las diferentes notaciones y terminologías aplicadas. Si bien en muchos casos se adopta el sistema convencional (ABC) para designar a los horizontes, algunos autores sostienen que esta nomenclatura no es la adecuada y -para el caso de los suelos tropicales- proponen sus propios símbolos y terminologías **Tabla 2** .

Tabla 2: Notaciones propuestas para la descripción morfológica de suelos con líneas de piedra.

Table 2: Nomenclature proposals for the morphological description of soils with stone lines.

Autor	Designación	Características
Ruhe & Cady (1954)	I	Horizontes A y B
	II	Línea de piedra
	III	Horizonte C
Nye (1955)	Cr	Horizontes superiores afectados a movimientos de reptación
	S	Horizontes sin movimiento
Sys (1960)	A	H _z . rico en M.O. y pobre en arcillas y sesquióxidos
	B	H _z . B ferralítico. En su base presenta la línea de piedra
	C	Roca madre fresca o alterada
Laporte (1962)* / Collinet (1969)**	A* o I**	Recubrimiento de textura fina
	B* o II**	Línea de piedras
	C* o III**	Roca alterada
Aubert & Ségalen (1966)	A	H _z . con M.O. bien evolucionada
	B	H _z . con predominio de minerales secundarios
	C	Roca madre alterada
Stoops (1967)	α	Material superficial
	β	"Stone layer" (β_1 =sedimentaria; β_2 = in situ)
	γ	Saprolito
Chatelin & Martin (1972)	Apexol	H _z . "appumique": rico en M.O.; H _z "structichrome": con estructura pedológica típica
	Infrasol	H _z . "sterimorphe": niveles endurecidos; H _z "gravillonnaire": materiales inmaduros de origen pedogenético; H _z "graveleux": materiales derivados del basamento; H _z . "rétichrome": plintita; H _z "alteritique": de alteración
Johnson (1993)	M o A	Manto superficial
	S o E	Línea de piedra
	W o BC	Transición a la roca meteorizada

Una de las primeras propuestas fue realizada por Ruhe & Cady (1954), en la cual se divide el perfil en tres partes: I, corresponde al material por encima de la línea de piedra y donde se encuentran los horizontes A y B; II, a la línea de piedra; y III, al material por debajo de ésta y donde comienza el horizonte C. De esta manera, la base del perfil culmina en I, no considerándose a la línea de piedras como parte integrante del solum.

Luego Nye (1955) introdujo una nueva terminología para describir a los suelos de África. Su sistema se basó en la hipótesis de que los horizontes superiores ("Cr") están afectados por un movimiento de reptación permanente a lo largo de la pendiente. Los horizontes inferiores ("S") en cambio, son inmóviles y los denomina "horizontes sedentarios". Más tarde Sys (1960) sugiere dos divisiones superpuestas, una genética y que se aplica a todo el perfil de alteración, mientras que la otra sólo se aplica a la parte

superior influenciada por la actividad biológica. Los horizontes genéticos comprenden: el horizonte A, caracterizado por un enriquecimiento en materia orgánica y un empobrecimiento en sesquióxidos y arcilla; el horizonte B (llamado “B ferralítico”), desarrollado entre el anterior y la roca madre alterada, donde se encuentra la máxima acumulación de sesquióxidos y arcillas además un nivel de elementos gruesos en su parte inferior; y por último el horizonte C, que comprende a la roca madre ya sea fresca o alterada. La otra división contempla los mismos horizontes, no obstante, diferencia el B ferralítico en dos partes: la superior o B estructural, y la inferior o C, que comprende tanto a la parte inferior del B ferralítico como al horizonte C de la clasificación genética (Stoops, 1967).

Por su parte, Laporte (1962) dividió a perfiles estudiados en el Congo en tres horizontes principales. El horizonte A corresponde al recubrimiento de textura fina, el B a los elementos gruesos y el C a la roca alterada subyacente. Collinet (1969) en cambio, para suelos estudiados en Gabón, prefiere identificar a esos mismos niveles como I, II y III.

Aubert & Ségalen (1966) presentan una propuesta para la clasificación de los suelos ferralíticos en la cual no se hace referencia a las líneas de piedra en la definición de los horizontes principales. De esta manera, el horizonte A es aquél donde la materia orgánica se encuentra bien evolucionada, el B (generalmente el de mayor espesor) es el horizonte caracterizado por la abundancia de minerales secundarios en detrimento de los primarios, y el C corresponde a la roca madre alterada.

A diferencia de los anteriores, Stoops (1967) utiliza letras griegas a fines de desligarse de la tradicional terminología ABC y, de esta manera, evitar confusiones con los suelos de regiones templadas. Denomina como alfa (α) al material superficial, beta (β) a la “stone layer” (capa de piedras), y gama (γ) al saprolito. A su vez, la “stone layer” se subdivide en β_1 , de origen sedimentario, y en β_2 originada *in situ*.

Posteriormente, Chatelin & Martin (1972) desarrollan una terminología descriptiva y proponen nombres que permiten caracterizar mejor las propiedades morfológicas de los horizontes mayores, como lo son la estructura, los límites entre horizontes, etc. Los horizontes mayores son siete, y sus denominaciones en francés corresponden a: 1) horizonte “appumique”: parte superior del suelo, rica en materia orgánica y empobrecida en arcilla y sesquióxidos; 2) horizonte “structichrome”: es el horizonte mineral que posee una organización estructural netamente pedológica; 3) horizonte “sterimorphe”: son los niveles endurecidos y comprenden a las costras ferruginosas, petroplintitas, etc; 4) horizonte “gravillonnaire”: conformado por materiales inmaduros de origen pedogenético, ya sean de forma redondeada o angulosa (placas), en porcentajes superiores al 50 o 60 %; 5) horizonte “graveleux”: similar al anterior, pero en este caso los materiales derivan del basamento geológico; 6) horizonte “rétichrome”: también llamado plintita, consiste en un horizonte caracterizado por desarrollo de un retículo color rojo u ocre-rojizo, relacionado a procesos de hidromorfismo; 7) horizonte “alteritique”: horizonte de alteración, con una organización estructural no necesariamente pedogenética, formado por partículas de cuarzo, filosilicatos, sesquióxidos, etc. Por otra parte, el perfil de suelo es dividido en dos partes: la superior o “apexol”, que comprende a los horizontes 1 y 2, y la inferior o “infrasol” constituida por los horizontes restantes.

Por último, Johnson (1993) utiliza conjuntamente dos convenciones de designaciones para horizontes de suelo en su “Teoría de la Denudación Dinámica”, éstas son el tradicional sistema ABC, y el MSW de Watson (1961). El horizonte principal M (“mantle”) o A, que corresponde al manto superficial; el

horizonte principal S (“stone line”) o E, que comprende a la línea de piedras y; el horizonte principal W (“weathered”) o BC, donde se encuentra la transición a la roca meteorizada.


Es evidente que, en zonas intertropicales, donde se producen intensos procesos de meteorización y de evolución del paisaje, los suelos son complejos y todas estas terminologías tratan de reflejar esa complejidad de los perfiles. Si bien algunas mantienen el uso del clásico sistema ABC, el significado que se le ha atribuido a cada uno de estos horizontes es diferente. Mientras algunas son básicamente descriptivas y morfológicas, la mayoría tienen una connotación genética.

Las líneas de piedra y los sistemas de clasificación de suelos

En las versiones antiguas de algunos sistemas de clasificación, como por ejemplo en Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1975), la leyenda de FAO (FAO-UNESCO, 1988) y en actuales clasificaciones de Brasil (Prado, 2003), las líneas de piedra no han sido consideradas. Este hecho podría deberse a que tradicionalmente se le ha atribuido un origen geológico más que pedogenético (Ségalen, 1994). Por otra parte, en los sistemas de clasificación de Bélgica, Francia y Portugal, las líneas de piedra son consideradas como un rasgo indicativo de discordancias. En el sistema Francés (C.P.C.S., 1967) por ejemplo, los suelos ferralíticos que presentan una discontinuidad marcada por un cambio de textura o una línea de piedras son llamados “remaniés” (reorganizados o retrabajados), término que conlleva un significado genético y que Ségalen *et al.* (1979) prefieren reemplazar por el de “graveleux” (con gravas) o “caillouteux” (con guijarros), ambos de carácter descriptivo.

Finalmente, en posteriores revisiones de Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 1999) se incluyen a las líneas de piedra dentro de las discontinuidades litológicas, indicando que el suelo podría haberse desarrollado en más de un tipo de material parental. Se sostiene además, que el material que yace por encima de la línea de piedras sería transportado y el material por debajo podría tener un origen distinto.

■ LAS LÍNEAS DE PIEDRA DEL NORESTE ARGENTINO

En nuestro país, suelos con líneas de piedra -de acuerdo con la definición clásica de este rasgo- son comunes en las provincias de Misiones y norte de Corrientes **Figura 1** , en su mayoría vinculados con los “suelos rojos” pertenecientes a los órdenes Ultisol, Alfisol y Oxisol. Las mismas se encuentran generalmente cerca del saprolito basáltico, conformando uno o más horizontes pedregosos. También es frecuente en estos niveles, el desarrollo de agregados poliédricos (“horizontes estructurados”) que se destacan claramente respecto a la estructura de gránulos agregados en bloques débiles, que caracteriza a los horizontes superiores del suelo (Morrás *et al.* 2006; 2009).

Desde el punto de vista genético, los suelos rojos de esta región han sido considerados tradicionalmente como derivados a partir de la meteorización de la roca basáltica de la Fm Serra Geral (130 Ma.), interpretaciones sostenidas por estudios petrológicos (Riggi & Riggi, 1964) y pedológicos (Sanesi, 1965) de detalle. No obstante, estas contribuciones no explican el origen de las líneas de piedra ni otros rasgos morfológicos relacionados, los cuales han sido utilizados por Iriondo *et al.* (1997), Iriondo & Kröhling (1997; 2004) y Kröhling & Iriondo (2010) como argumentos para sostener la aloctonía de los materiales. Estos autores postularon para el ámbito de la provincia de Misiones y zonas aledañas, que el material que cubre la roca basáltica y en el que se desarrollan los suelos, es un sedimento eólico (“loess tropical”)

de edad Pleistoceno Tardío-Holoceno reciente, deflacionado de las llanuras aluviales de los ríos Paraná y Uruguay. Asimismo, consideran que las “líneas de piedra” conformadas por gravas de cuarzo de morfología laminar, serían depósitos torrenciales y que el material estructurado subyacente se relaciona con una paleosuperficie enterrada por el depósito loésico, al que denominaron “Formación Oberá”. Por su parte Johnson *et al.* (2005-b) describen un perfil en Misiones como un biomanto de dos capas, la inferior constituida por una capa de piedras conformada por guijarros de cuarzo; esta capa de piedras sería pedogénica y resultante de la bioturbación y selección producida por las termitas.

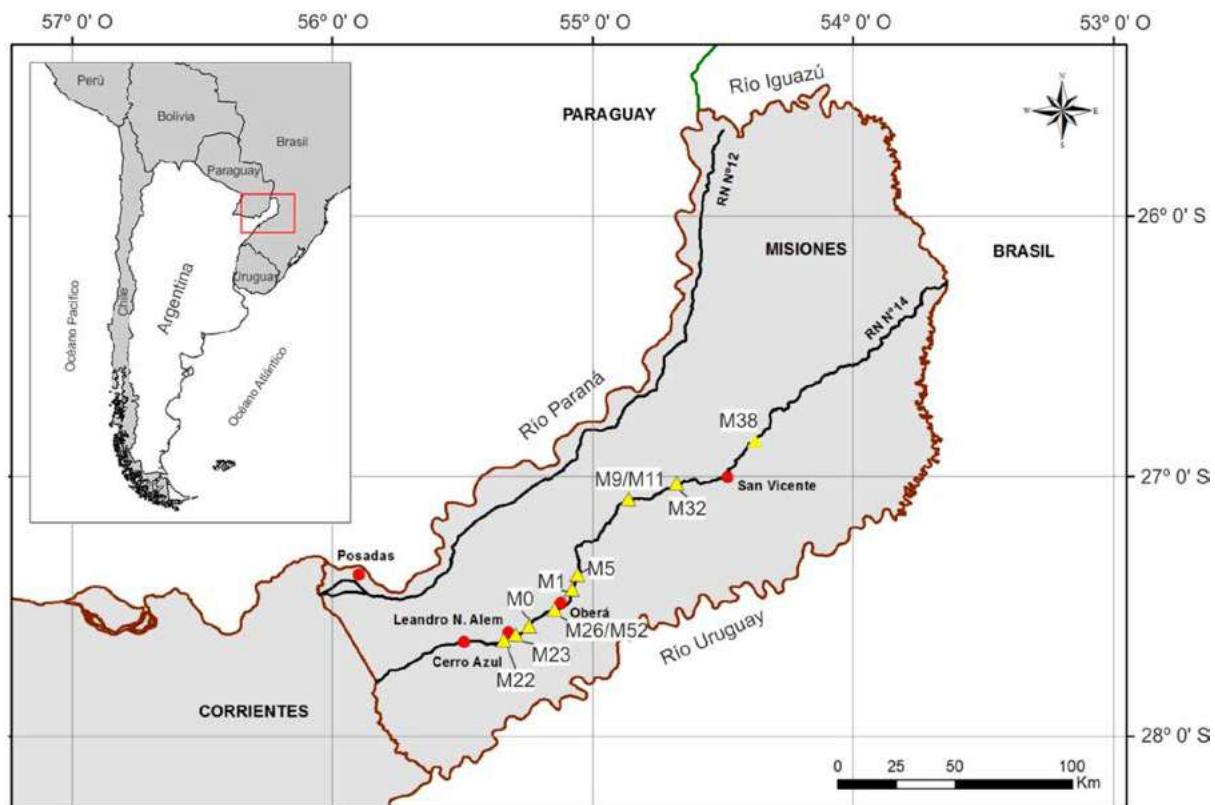



Figura 1: Ubicación de los perfiles de suelo con líneas de piedra referenciados en el texto (triángulos amarillos).

Figure 1: Location of the soil profiles with stone lines referenced in the text (yellow triangles).

Por el contrario, sobre la base de estudios detallados de diversos perfiles con una amplia diversidad de técnicas analíticas (Moretti *et al.*, 2006; Morrás *et al.*, 2005; 2006; 2009; 2010; Moretti & Morrás, 2012; 2013), concluimos que el material parental de los suelos de Misiones, así como los horizontes o “líneas de piedra” de naturaleza ferruginosa y silícea y los niveles estructurados que se les asocian, son el resultado de la meteorización *in situ* de la roca basáltica, no habiéndose constatado procesos adicionales de acumulación de los materiales gruesos por bioturbación. Si bien en estos suelos es evidente la importante actividad de la fauna en la selección y transporte de material fino hacia la superficie llevada a cabo especialmente por las termitas, esto no parece haber influido en los procesos de acumulación de los materiales más gruesos. De esta manera y como será desarrollado a continuación, además de acordar con la hipótesis tradicional referida al desarrollo de los perfiles como consecuencia de la meteorización del basalto, se brinda una explicación acerca del origen y evolución de estos rasgos característicos de los suelos rojos de la región. Asimismo, los resultados analíticos obtenidos también proveyeron evidencia de los cambios paleoclimáticos y de la naturaleza poligenética de estos suelos fuertemente meteorizados.

Origen, composición y morfología de las líneas de piedra en los suelos rojos

Los suelos rojos profundos de la provincia de Misiones, principalmente aquellos desarrollados en la Meseta central preservada (Ligier *et al.*, 1990), presentan uno o más niveles caracterizados por la abundancia de materiales gruesos. Como ha sido discutido aquí, y siguiendo la concepción tradicional aloctonista o sedimentaria, se denominarían “líneas de piedra” o “capas de piedra”. No obstante, y de acuerdo con nuestros resultados discutidos a continuación, basados en la hipótesis autoctonista de los materiales, éstos son considerados como horizontes.

Se identifican dos tipos principales de horizontes pedregosos en relación con su origen, composición y morfología. Asociados a estos internamente y/o por debajo de los mismos, la fracción fina presenta frecuentemente agregados con estructura en bloques angulares y subangulares, diferentes a los observados en el resto del perfil de suelo **Figura 2** .

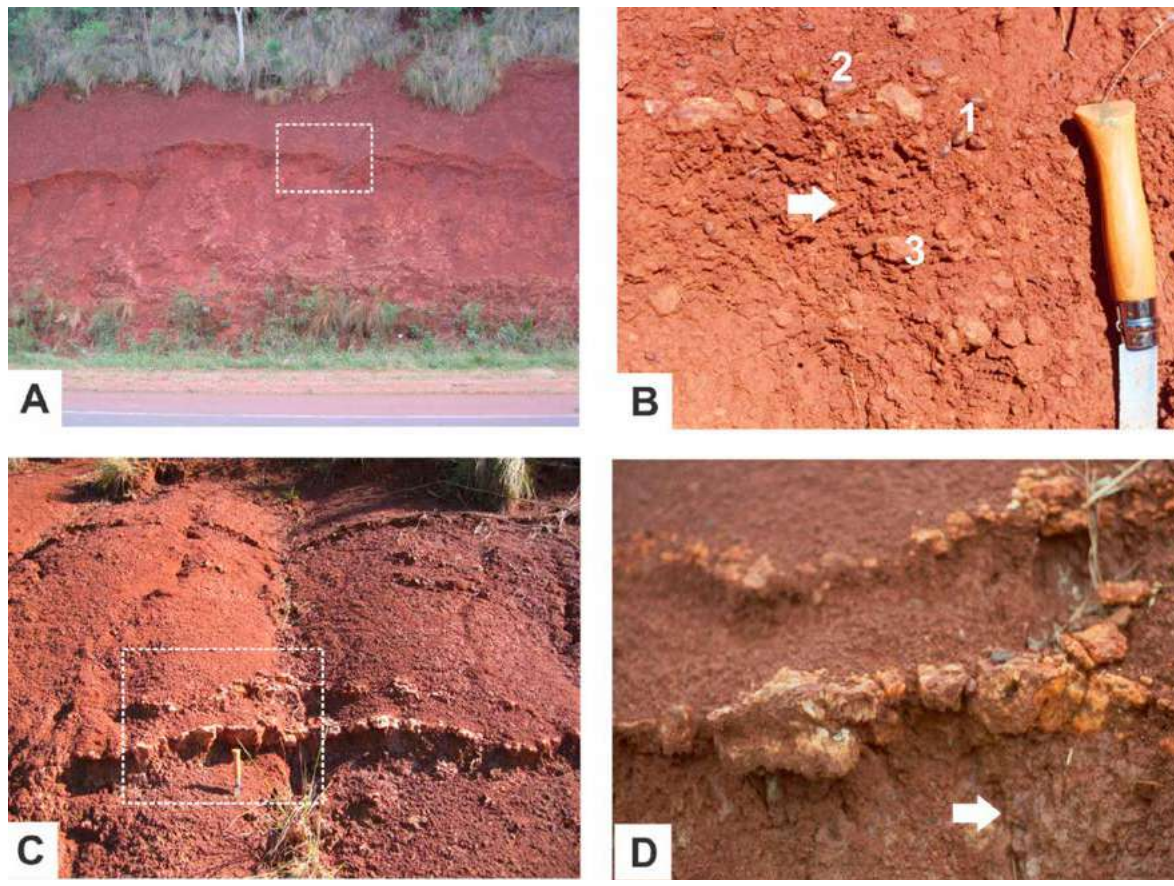


Figura 2A: perfil M0 (27° 35' 09" S; 55° 15' 16" O). Suelo con desarrollo de “horizonte de nódulos ferruginosos”. **B:** detalle del área recuadrada en A; 1) nódulos hematíticos, 2) nódulos goethíticos, 3) nódulos intermedios. La flecha indica un sector donde se aprecia el desarrollo de agregados en bloques. **C:** perfil M5 (27° 23' 16" S; 55° 03' 49" O). Suelo con dos tipos de horizontes pedregosos. Arriba presenta horizonte de nódulos ferruginosos y abajo dos niveles de horizontes silíceos. **D:** detalle del área recuadrada en C. El horizonte silíceo, compuesto de cristales de cuarzo, yace directamente sobre el saprolito, el cual presenta estructura en bloques (flecha).

Figure 2 A: M0 profile (27° 35' 09" S; 55° 15' 16" W). Soil with “ferruginous nodular horizon”. **B:** detail of the area enclosed in A; 1) hematitic nodules, 2) goethitic nodules, 3) intermediate nodules. The arrow indicates a sector with development of blocky aggregates. **C:** M5 profile (27° 23' 16" S; 55° 03' 49" W). Soil with two types of stony horizons. In the upper part lies a horizon of ferruginous nodules and in the lower part two levels of siliceous horizons. **D:** detail of the area enclosed in C. The siliceous horizon, composed of quartz crystals, lies directly on the saprolite, which presents a blocky structure (arrow).

Horizontes de nódulos ferruginosos" (H.N.F). Están compuestos por nódulos de hierro del tamaño grava, con un diámetro medio comprendido entre 10-15 mm. Se clasifican en: a) nódulos hematíticos: los de menor tamaño, de color gris rojizo (10 R 5/1) y aspecto brillante; b) nódulos goethíticos: los de mayor tamaño, de color amarillo anaranjado (10 YR 8/6) y opacos, y; c) nódulos intermedios: varían en color y composición **Figura 2B** *1; **3B** . En lo referido a la composición mineralógica de la matriz del suelo que rodea a los nódulos, ésta comprende además de los óxidos e hidróxidos de hierro mencionados, proporciones variables de cuarzo, magnetita, caolinita, gibsita y pseudoclorita o vermiculita hidroxi-alumínica (HIV en la abreviación en inglés) **Figura 3B** . Por su parte, los diagramas de DRX y la microscopía electrónica de transmisión de la fracción arcilla muestran la presencia principalmente de caolinitas, incluyendo una proporción no determinada de haloisita, acompañadas por una menor proporción de pseudocloritas. Las primeras disminuyen progresivamente desde el saprolito hacia la superficie, mientras que las segundas lo hacen en sentido inverso, variación que se relaciona con el proceso de meteorización de la roca basáltica **Figura 3C** .

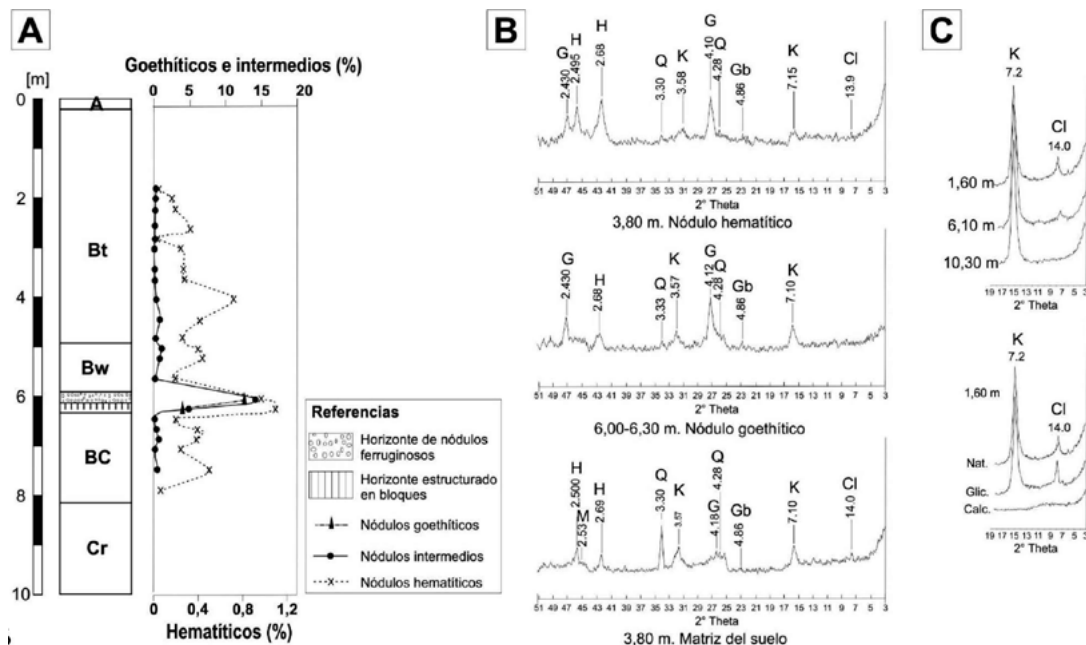
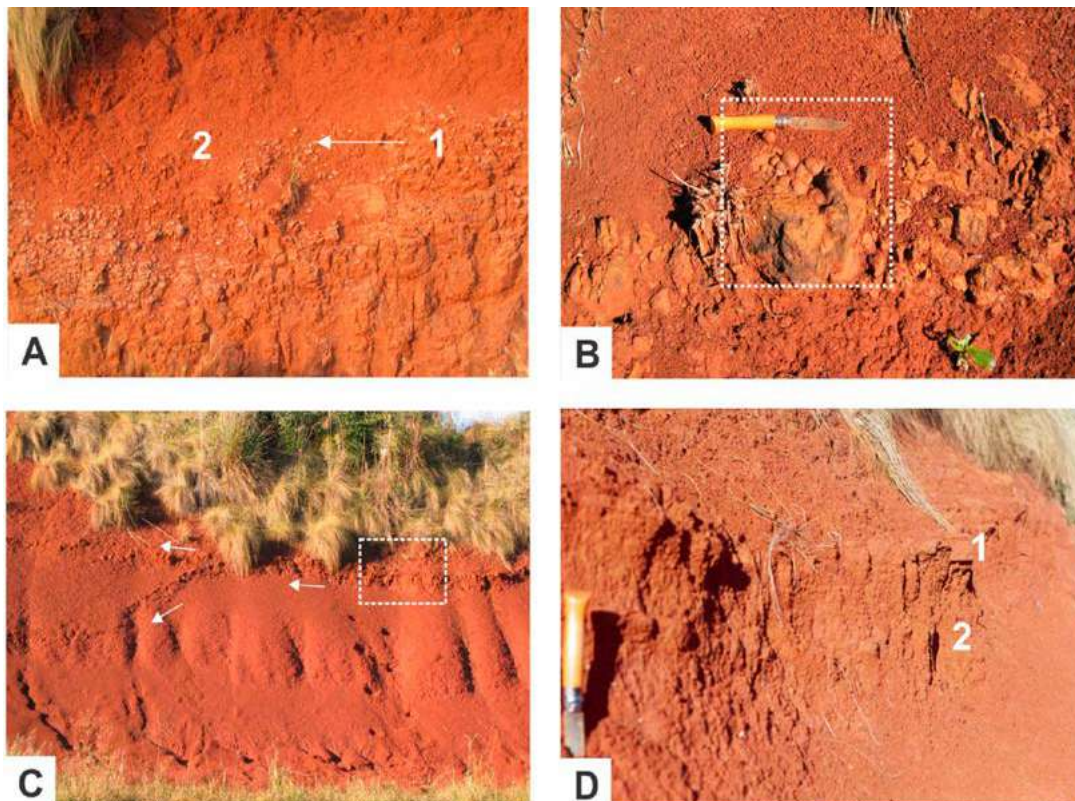


Figura 3: Perfil M0. **A:** distribución vertical de los diferentes tipos de nódulos ferruginosos. **B:** diagramas de difracción de rayos X en polvo natural de un nódulo hematítico (superior), goethítico (intermedio) y de la matriz del suelo (inferior). G) goethita, H) hematita, M) magnetita, Q) cuarzo, K) caolinita, Gb) gibsita, Cl) pseudoclorita/HIV. **C:** diagramas de difracción de rayos X de la fracción arcilla natural a tres profundidades (superior) y a 1,60 m (inferior) donde se comparan los tratamientos de identificación, Nat.) natural, Glic.) glicolado y Calc.) calcinado a 520°C.

Figure 3: Profile M0. **A:** vertical distribution of different types of ferruginous nodules. **B:** X-ray diffraction patterns in natural powder of a hematitic nodule (above), goethitic (middle) and of the soil matrix (below). G) goethite, H) hematite, M) magnetite, Q) quartz, K) kaolinite, Gb) gibbsite, Cl) pseudochlorite/HIV. **C:** X-ray diffraction diagrams of the natural clay fraction at three depths (upper) and at 1.60 m (lower) where the identification treatments are compared, Nat.) natural, Glic.) glycolated and Calc.) heated at 520° C.

Diversos resultados analíticos sugieren el origen *in situ* de estos horizontes. Por un lado, la elevada proporción de nódulos si bien define un determinado nivel, en el caso de los de composición hematítica e intermedia también se distribuyen a través de todo el perfil de suelo, incluyendo al saprolito **Figura 3A** . Esto indica que sus concentraciones no serían el resultado de procesos sedimentarios de acumulación. Además, la composición goethítica de aquellos que yacen únicamente en los horizontes

nodulares no parece compatible con una exposición superficial bajo un clima árido, como sería el caso en la hipótesis aloctonista. Por otro lado, en numerosos perfiles se observaron transiciones horizontales y verticales de un cuerpo saprolítico homogéneo a niveles con una incipiente generación de nódulos goethíticos redondeados, que pasan a fragmentos más endurecidos e individualizados, resultando en un tipo de horizonte nodular de carácter residual **Figura 4A** . Estos nódulos se formarían como resultado de una caolinización de los fenocristales de plagioclasas, alteración de los minerales ferromagnesianos y una acumulación relativa de un plasma goethítico (Nahon, 1991) **Figura 5** *1. El proceso de individualización de cuerpos esferoidales debe ser todavía estudiado en detalle, pero posiblemente este resultado a escala centimétrica podría relacionarse con los procesos de “meteorización esferoidal” mencionados específicamente en basaltos masivos de Misiones (Riggi & Riggi, 1964; Marengo *et al.*, 2005). En ciertos casos se ha observado claramente la formación de nódulos goethíticos de 2-3 cm de diámetro a partir de fragmentos de roca saprolitizada de mayor volumen que también tenían caras curvadas **Figura 4B** . Como puede observarse en la **Figura 6A** *1, las superficies expuestas de coladas de basalto masivo saprolitizadas presentan también en su conjunto formas más redondeadas que las del saprolito vesicular.



* 1

* 2

Figura 4A: Perfil M23 (27° 37' 00" S; 55° 18' 22" O) donde se observa claramente el pasaje entre el saprolito homogéneo (1) y un sector con nódulos esparcidos en la matriz del suelo (2). **B:** Perfil M1 (27° 26' 31" S; 55° 04' 57" O). Se observan grandes e irregulares fragmentos de basalto meteorizado, a partir de los cuales se individualizan nódulos esferoidales (área recuadrada). **C:** Perfil M52 (27° 30' 37" S; 55° 08' 18" O). Suelo con un nivel de fragmentos ferruginosos de morfología laminar que muestra bifurcaciones en sentido lateral (flechas). **D:** detalle del sector recuadrado en C. Los fragmentos ferruginosos laminares (1) yacen por encima y entre los agregados del suelo, en forma de bloques y prismas (2).

Figure 4 A: Profile M23 (27° 37' 00" S; 55° 18' 22" W) where the transition between the homogeneous saprolite (1) and a sector with nodules scattered in the soil matrix (2) is clearly observed. **B:** Profile M1 (27° 26' 31" S; 55° 04' 57" W). Large and irregular fragments of weathered basalt are observed, from which spheroidal nodules (squared area) become individualized. **C:** Profile M52 (27° 30' 37" S; 55° 08' 18" W). Soil with a level of ferruginous laminar fragments showing lateral bifurcations (arrows). **D:** detail of the sector squared in C. The ferruginous laminar fragments (1) lie above and between the blocky and prismatic soil aggregates (2).

La observación microscópica de estos horizontes muestra claramente la textura de la roca basáltica de la cual derivan, con fenocristales de plagioclasas y minerales máficos parcialmente meteorizados. Asimismo, la masa basal circundante de color rojizo presenta agregados en forma de bloques angulares, producto del enriquecimiento progresivo en arcilla y óxidos de hierro (Moretti & Morrás, 2012; 2013)

Figura 5 ©.

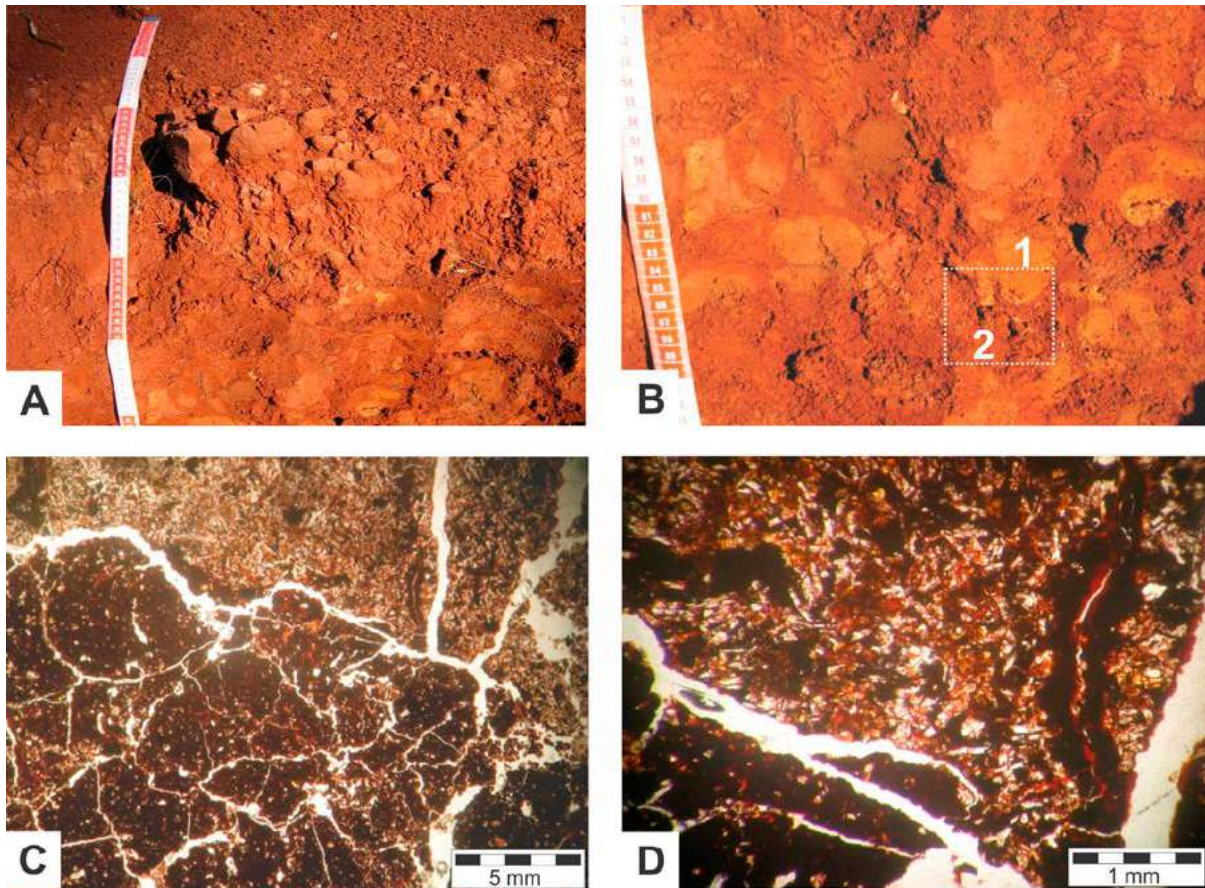













Figura 5: Perfil M26 (27° 30' 43" S; 55° 08' 37" O). Suelo con horizonte de nódulos ferruginosos. **A:** la matriz de textura fina ubicada entre los nódulos desarrolla estructura en bloques. La erosión a lo largo de la pared de la excavación ha eliminado parte del material fino por encima del horizonte nodular, dando el aspecto final de un nivel de nódulos yaciendo por encima de un horizonte estructurado. **B:** detalle de A. Pueden observarse dos fases morfológicas y composicionales resultantes del proceso de meteorización: nódulos ferruginosos amarillentos (1) y matriz arcillosa rojiza (2). **C:** corte delgado del área recuadrada en B. Microscopía óptica, luz directa. Nódulo ferruginoso alteromórfico (Stoops, 2015), donde se observa la fábrica del saprolito (parte superior de la foto), en contacto con la masa basal del suelo arcillosa y estructurada en bloques. **D:** detalle de C. Los fenocristales meteorizados de la matriz del nódulo aparecen teñidos con óxidos de hierro de color rojo-amarillento. En el borde exterior del nódulo y en las paredes de sus poros internos se observan sectores oscuros de textura fina (arcillosos y ferruginosos), los que se desprenden progresivamente del nódulo meteorizado y son incorporados en la masa basal circundante.

Figure 5: Profile M26 (27° 30' 43" S; 55° 08' 37" W). Soil with ferruginous nodular horizon. **A:** The fine texture matrix located between the nodules develops blocky structure. The erosion along the excavation wall has removed some of the fine material above the nodular horizon, giving the final appearance of a level of nodules lying above a structured horizon. **B:** detail of A. Two morphological and compositional phases, resulting from the weathering process, can be observed: yellowish ferruginous nodules (1) and reddish clay matrix (2). **C:** thin section of the area squared in B. Optical microscopy, plain polarized light. Alteromorphous ferruginous nodule (Stoops, 2015) displaying the fabric of the saprolite (upper part of the photo), in contact with the clayey ferruginous groundmass structured in blocks is observed. **D:** detail of C. The weathered phenocrysts of the nodule matrix are stained with reddish-yellow iron oxides. At the outer edge of the nodule and in the walls of its inner pores, dark sectors of fine texture (clayey and ferruginous) are observed, which are progressively detached from the weathered nodule and are incorporated into the surrounding groundmass.

Horizontes silíceos (H.S.). En muchos casos las acumulaciones de materiales duros y gruesos corresponden a niveles continuos de cuarzo con espesores variables de entre pocos milímetros a 30 cm o más **Figura 2C** *2 y **2D** *2, identificándose también, niveles fragmentados de poco espesor y morfología laminar **Figura 6D**  y **9C** *1. En general es evidente que los niveles cuarcíticos son claramente relícticos, ya que derivan de venas incluidas previamente en el basalto, y que han sido preservadas por meteorización diferencial. De esta manera, se han observado transiciones verticales y laterales entre la roca basáltica fresca intruida por venas de cuarzo y el suelo rojo, en donde las venas se conservan en este último formando un nivel continuo **Figura 6A** , **6B**  y **6C** . Con menor frecuencia, estos niveles parecen resultar de una acumulación secundaria de sílice liberada durante la meteorización, en cuyo caso deberían ser considerados como silcretes.

Morfológicamente, estos horizontes relícticos son básicamente masivos **Figura 7A**  y **7B** . Sin embargo, en algunas excavaciones y paredes verticales, como consecuencia de la labor mecánica ocurren fragmentaciones de niveles de cuarzo potentes, lo cual no es observado cuando el material que los cubre es removido cuidadosamente. Las venas más finas pueden aparecer naturalmente fragmentadas como resultado del fracturamiento y la disolución durante la meteorización, pero los fragmentos resultantes aparecen perfectamente acomodados **Figura 6D**  y **9D** *2.



La observación microscópica de ciertos perfiles de suelo con horizontes silíceos reveló también una elevada proporción de poros vesiculares, en su mayor parte rellenos con calcedonia **Figura 7C**  y **7D** . De este modo, pudo interpretarse que la porosidad vesicular heredada de la roca basáltica fue fosilizada por precipitación de sílice proveniente de la meteorización, demostrando claramente el carácter residual del material parental del suelo. A su vez, la fracción gruesa evidenció estar compuesta tanto por granos esféricos de calcedonia, como irregulares de cuarzo, estos últimos heredados de las venas hidrotermales incluidas en la roca basáltica.



Figura 6: Desde A hasta C se muestra una secuencia de diferentes estadios de meteorización de la roca basáltica y desarrollo de horizontes nodulares y silíceos en el mismo sitio (Perfil M38: 26° 52' 06" S; 54° 22' 42" O). **A:** Nivel de basalto masivo saponitizado (1) sobre otro de tipo vesicular saponitizado (2) que incluye numerosas venas de cuarzo regularmente espaciadas. **B:** En el tope de la secuencia se observa un perfil de suelo desarrollado a partir del basalto masivo, con un horizonte nodular en su base; por debajo de este se presenta el basalto vesicular meteorizado exhibiendo varios horizontes silíceos paralelos (venas de cuarzo).

Figure 6: From A to C, a sequence of different stages of weathering of basaltic rock and development of nodular and siliceous horizons in the same site (Profile M38: 26° 52' 06" S; 54° 22' 42" W). **A:** Saponitized massive basalt (1) overlying a vesicular saponitized type (2) that includes numerous regularly spaced quartz veins. **B:** At the top of the sequence, a soil profile developed from massive basalt with a nodular horizon at its base is observed; below this, lies the weathered vesicular basalt exhibiting several parallel siliceous horizons (quartz veins).

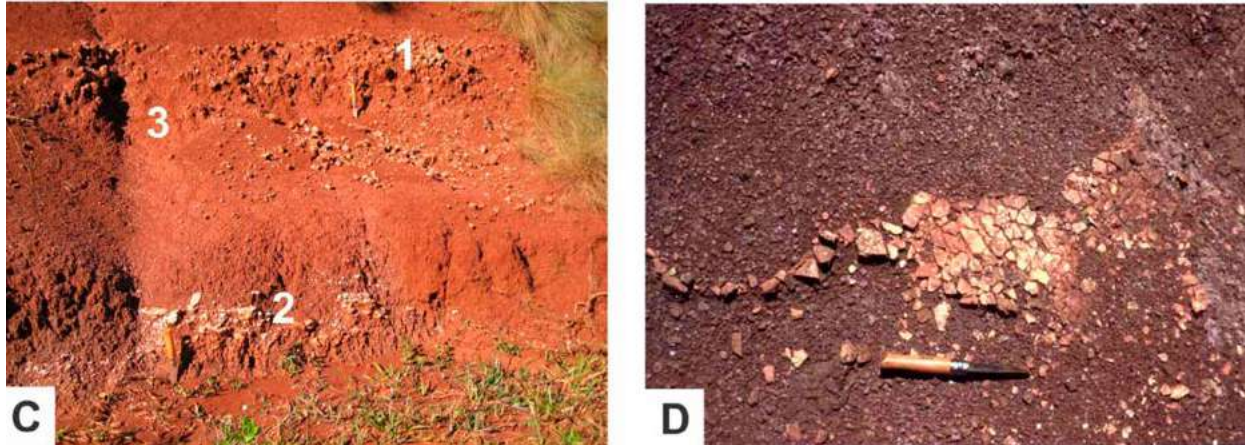


Figura 6C: Estadío más avanzado de meteorización. Arriba: un horizonte nodular que deriva del basalto de tipo masivo (1); debajo: una vena relíctica de cuarzo (2) derivada del basalto de tipo vesicular. Notar que la estructura en bloques, asociada a ambos tipos de materiales gruesos, se encuentra menos expresada cuando éstos están más esparcidos o disminuyen en cantidad (3). **D:** Sitio M11 (27° 05' 18" S; 54° 51' 10" O). Vista en planta de la parte superior de una delgada vena de cuarzo expuesta por erosión. Obsérvese como los pequeños fragmentos se hallan acomodados. En este caso, una simple observación de la parte externa de la vena (como ocurre en el sector izquierdo de la fotografía), puede conducir a una errónea interpretación de estos fragmentos, dado que podría considerárselos como gravas aisladas y transportadas.

Figure 6C: More advanced stage of weathering. Above: a nodular horizon derived from massive basalt (1); below: a quartz vein (2) derived from vesicular basalt. Note that the blocky structure, associated with both types of coarse materials, is less expressed when they are more scattered or decrease in quantity (3). **D:** Site M11 (27° 05' 18" S; 54° 51' 10" W). Superficial view of a thin quartz vein exposed by erosion. Observe how the small fragments are accommodated. In this case, a simple observation of the external part of the vein (as can be seen in the left side of the photograph) can lead to erroneous interpretations, as the fragments seem to appear isolated and would possibly be considered transported.

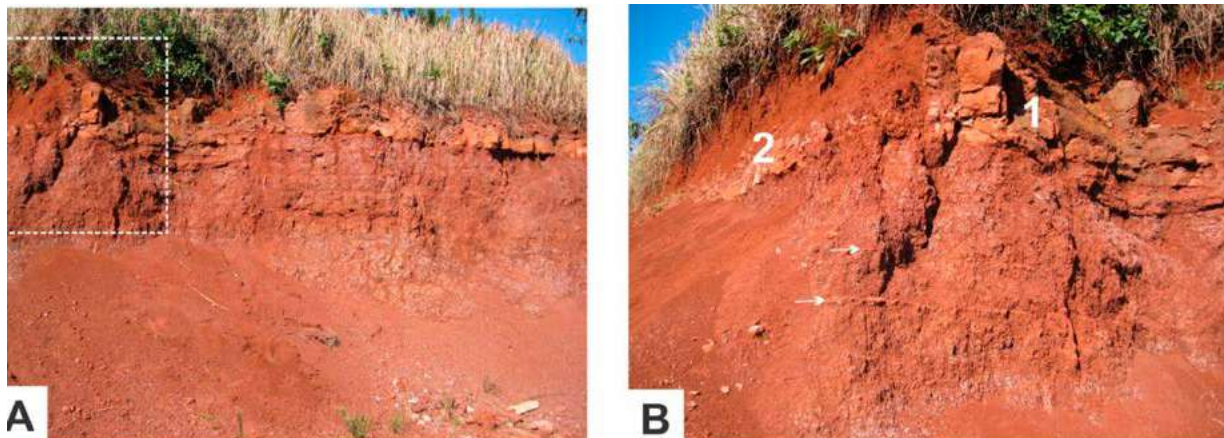


Figura 7: Perfil M22 (27° 37' 58" S; 55° 20' 33" O). **A:** Suelo rojo poco profundo caracterizado por la presencia de una potente vena subhorizontal de composición silíceas en contacto con el saprolito basáltico. **B:** sector recuadrado en A. Hacia la derecha se observa el saprolito incluyendo la vena de cuarzo masiva (1) en la parte superior y numerosas venillas regularmente espaciadas (flechas) más abajo. Hacia la izquierda, la misma vena masiva aparece más fragmentada y aislada dentro del perfil de suelo (2): una simple y focalizada observación de este sector sin tener en cuenta el resto del perfil, podría conducir a una errónea interpretación respecto a su origen.

Figure 7: Profile M22 (27° 37' 58" S; 55° 20' 33" W). **A:** A shallow red soil characterized by the presence of a thick subhorizontal vein of siliceous composition in contact with the saprolite. **B:** sector squared in A. On the right side of the photo, the saprolite includes the massive quartz vein (1) in its upper part, and numerous regularly spaced veins (arrows) in its lower part. To the left, the same massive vein appears fragmented and isolated within the soil profile (2): a simple and focused observation of this sector without taking into account the rest of the profile, could lead to an erroneous interpretation regarding to its origin.

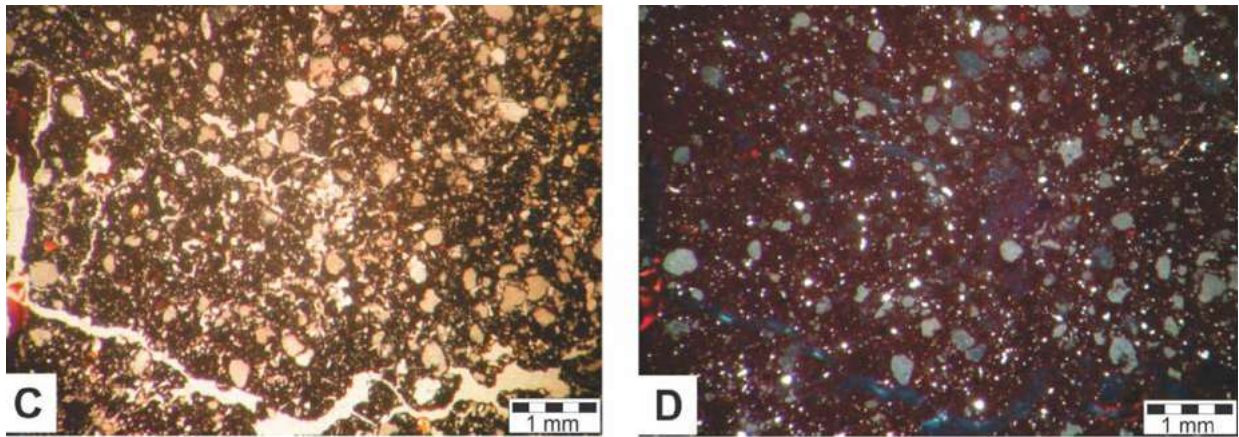







Figura 7C: corte delgado de un horizonte transicional (BC) a la profundidad de 1,80 m. Microscopía óptica, luz directa. Se observa una elevada proporción de granos redondeados de calcedonia junto con granos cuarzo y revestimientos de arcilla. **D:** misma área que en C, con polarizadores cruzados. En tonalidades de grises se aprecian los granos de calcedonia redondeados en contraste con los granos más blanquecinos y pequeños de cuarzo.


Figure 7C: thin section of a transitional horizon (BC) to the depth of 1.80 m. Optical microscopy, plain polarized light. A high proportion of rounded chalcedony grains, together with quartz grains and clay coatings, is observed. **D:** same area as in C, with crossed polarizers. Rounded chalcedony grains in shades of gray contrast with whitish and small quartz grains.














Horizontes estructurados en bloques (H.E.B.). En muchos perfiles, en su parte media o inferior, es común la presencia de uno o más horizontes caracterizados por sus estructuras en bloques angulares y subangulares moderados a fuertes, y eventualmente prismas, que contrastan con los horizontes directamente sobreyacentes, donde los microagregados se organizan en una estructura subangular débil **Figura 2B**  y **2D** . Frecuentemente los H.E.B. se hallan asociados a los dos tipos de horizontes antes mencionados y los estudios realizados sugieren que no son paleosuelos. Por consiguiente, dos procesos podrían ser los responsables de la formación de estos horizontes: a) Desarrollo de una matriz arcillosa entre los nódulos de hierro a medida que éstos se van individualizando; en este caso, la matriz que rodea los nódulos resulta finalmente en agregados poliédricos que se manifiestan dentro del mismo horizonte nodular. Es importante destacar que en algunas situaciones se encontró que el propio saprolito presentaba las dos fases mencionadas, donde la más fina había desarrollado una marcada estructura poliédrica **Figura 2D** ; **Figura 5** . También se han observado secuencias laterales de meteorización de la roca basáltica, que van desde la roca fresca a un estadio avanzado de alteración, resultando en un material de textura fina con una estructura en bloques que incluyen nódulos ferruginosos redondeados; b) Efecto de “protección” que ejercen las gravas sobre los materiales de textura fina subyacentes ante el frente de meteorización, promoviendo el desarrollo de agregados: este proceso se relacionaría más con las venas de cuarzo que podrían producir modificaciones diferenciales en el tipo y/o intensidad de los procesos químicos, físicos y biológicos por encima y debajo del horizonte síliceo.


En resumen, para el caso de los suelos rojos de la meseta central misionera, es posible atribuir un origen autóctono tanto para los horizontes nodulares y síliceos, como para los “horizontes estructurados” asociados a éstos. Los “horizontes de nódulos ferruginosos” serían originados *in situ* y resultarían de la concentración relativa de óxido de hierro, inicialmente en forma de goethita. En una interpretación provisoria, estos nódulos evolucionarían posteriormente a través de la transformación progresiva de la goethita en hematita, generándose los nódulos designados como “intermedios” y finalmente los nódulos

hematíticos más pequeños. En este sentido, el análisis de la distribución por tamaño de los nódulos hematíticos e intermedios ha evidenciado un gradual decrecimiento de su diámetro medio hacia la superficie (Morrás *et al.*, 2009). Este hecho, así como la ausencia de nódulos en los primeros dos metros del perfil como se muestra en la **Figura 3** ^{*1}, sugiere que la meteorización superficial más intensa conduciría a una remobilización del hierro de estos nódulos y a su desaparición. En el caso de los “horizontes relícticos de sílice”, su ocurrencia aparece claramente relacionada con la pre-existencia de venas o niveles cuarcíticos dentro de la roca y que han sido conservados por ser más resistentes a la meteorización, más allá que puedan producirse disoluciones sobre la superficie de las venas o precipitaciones de la sílice liberada durante el proceso de meteorización del basalto.

Yacencia y distribución de los horizontes nodulares y silíceos

Tanto el tipo de horizonte, como así también su distribución espacial, tienen estrecha relación con la roca de la cual derivan. En Misiones han sido identificadas dos tipos de coladas basálticas **Figura 6A** ^{*2}: una de aspecto masivo y otra de tipo vesicular con frecuentes inclusiones de venas de cuarzo (Morrás *et al.*, 2009). Diferenciaciones litológicas similares fueron realizadas en sectores aledaños de Brasil por Schenato *et al.* (2003), quienes atribuyen estas características a los distintos estadios de enfriamiento que afectaron a las coladas. Por consiguiente, las diferencias litológicas y las variaciones estructurales a causa de la actividad tectónica regional, juegan un papel importante en la génesis de los horizontes nodulares y silíceos en los suelos ferralíticos de Misiones. Por ejemplo, el tectonismo afecta el nivel de base hidrológico, que a su vez, influye en la profundidad que alcanza el frente de meteorización. De esta manera, para el caso de los perfiles de meteorización profundos debe considerarse la posibilidad de encontrar variaciones morfológicas y/o composicionales atribuibles a la heterogeneidad vertical del material parental basáltico, el que además, podría incluir diferentes tipos de intrusiones intercaladas entre sus coladas. Es así, que además de los perfiles caracterizados por uno u otro tipo de horizonte (nodular o silíceo), se han observado también otras situaciones, como ser:

- Perfiles con más de un horizonte pedregoso del mismo tipo **Figura 10A** ^{*1};
- Perfiles con distintos tipos de horizontes y a diferentes profundidades **Figura 2C** ^{*4} y **6C** ^{*1};
- Horizontes con fragmentos ferruginosos de morfología laminar **Figura 4C** ^{*1} y **4D** ^{*1};
- Horizontes nodulares o silíceos que yacen directamente sobre el saprolito **Figura 2C** ^{*4}, **2D** ^{*4}, **7A** ^{*2} y **7B** ^{*2};
- Horizontes con direcciones subhorizontales, verticales y/o bifurcaciones **Figura 4C** ^{*1};
- Perfiles en donde los horizontes nodulares y silíceos muestran ondulaciones, descritas también como “funnel-like” (Stoops, 1967) **Figura 9B** ^{*1} y **9C** ^{*1};
- Perfiles que no presentan horizontes de acumulación de materiales gruesos definidos, sino más bien, los nódulos o los niveles cuarcíticos se encuentran esparcidos como una transición hacia el saprolito más homogéneo y coherente **Figura 4A** ^{*1};
- Perfiles que no presentan horizontes nodulares ni silíceos.

En líneas generales, la distribución de los dos tipos de horizontes pedregosos a lo largo de la provincia de Misiones puede dividirse en cuatro sectores dentro de las unidades geomorfológicas de la meseta central preservada y el pediplano parcialmente disectado (Ligier *et al.*, 1990) **Figura 1** ^{*1}

- 1- Cerro Azul-Leandro N. Alem: este sector comprende a un bloque tectónico con una altitud media de alrededor de 230 m.s.n.m. En esta región los suelos son en general poco profundos y los horizontes de piedras, principalmente nodulares, muestran un desarrollo incipiente;
- 2- Leandro N. Alem-Oberá: relacionado a otro bloque tectónico elevado con una altitud media de alrededor de 300 m.s.n.m. Aquí, los perfiles de suelos rojos son bastantes profundos y desarrollan “horizontes de nódulos ferruginosos” que yacen varios metros por debajo de la superficie del suelo;
- 3- Oberá-San Vicente: este sector comprende una serie de bloques fallados y posicionados de manera escalonada que se extienden desde la localidad de Oberá hacia el noreste de la provincia, con altitudes medias que incrementan de 300 a 430 m.s.n.m. en ese mismo sentido. Se caracterizan también por la presencia de suelos rojos profundos, pero con el desarrollo principalmente de “horizontes relícticos de sílice”. En menor medida aparecen horizontes nodulares, que en muchos casos resultan en perfiles complejos con superposición de uno o más niveles de igual o distinto tipo;
- 4- San Vicente–hacia el noreste: la altitud media de este sector es de alrededor de 300 m.s.n.m. Predominan los horizontes silíceos, aunque también se han observado horizontes nodulares.

■ IMPLICANCIAS DE LAS LÍNEAS DE PIEDRA EN LOS SUELOS



Una superficie considerable de la provincia de Misiones se encuentra cubierta por suelos pedregosos en el sentido tradicional, con poco desarrollo del perfil, con la roca más o menos alterada *in situ* o eventualmente transportada cercana a la superficie y que son clasificados como Entisoles, Inceptisoles o Molisoles. Son conocidas las restricciones que esto impone para su uso agrícola y su manejo, aun cuando puedan ser relativamente ricos desde el punto de vista de la fertilidad química (Mancini *et al.*, 1964). Por otro lado, gran parte de Misiones y NE de Corrientes están caracterizadas por la llamada “tierra colorada” (Ultisoles, y en menor medida Oxisoles y Alfisoles). Estos suelos rojos, muy evolucionados y de gran desarrollo en profundidad, son los de mayor importancia agrícola y los más fácilmente utilizables, presentan mejores condiciones físicas, aunque son más ácidos y menos ricos en nutrientes que los anteriores. Además -y particularmente los situados en el paisaje fuertemente ondulado de la meseta central de Misiones- presentan riesgo importante de erosión, acentuado por el laboreo excesivo. Como se describió aquí, estos suelos son los que presentan “horizontes pedregosos” (líneas de piedra) de diferente tipo y a profundidades diversas. Sin embargo, hasta el momento no han sido consideradas las implicancias prácticas de estos horizontes, no existiendo desde ya evaluaciones ni datos experimentales.

En lo que sigue se realizará en consecuencia un primer análisis de la posible influencia de esos horizontes de acumulación de materiales gruesos en el desarrollo de las plantas y en los procesos hidrológicos y erosivos de los suelos rojos. Verosimilmente su incidencia dependerá de la profundidad a la que se encuentran, de su morfología en cuanto a espesor, extensión y desarrollo lateral y también de su composición en cuanto al tipo de material grueso (nódulos ferruginosos o acumulaciones silíceas).

Los horizontes pedregosos (nodulares y silíceos) como impedancia para el desarrollo vegetal

En los suelos se considera como impedancia a un obstáculo físico para el desarrollo de las raíces, provocando deformaciones y distribuciones irregulares de las mismas, restringiendo el volumen útil para el desarrollo radicular y disminuyendo así la capacidad del suelo para la oferta de nutrientes. La presencia de fragmentos gruesos en el suelo condiciona el crecimiento de vegetación dado que éstos se comportan como una barrera física a la exploración radical, y el impacto sobre la productividad depende de la capacidad que tienen las plantas para adaptarse o sortear ese obstáculo (Delgado Espinoza, 1999). Según Taboada *et al.* (2008) el efecto de las impedancias físicas sobre el crecimiento de las raíces depende de las condiciones del suelo, de la especie vegetal y del estado de desarrollo de las plantas. Entre los factores edáficos mencionados por estos autores y aplicables para los casos aquí considerados se cuentan el espesor que abarca la impedancia en el perfil, el nivel de dureza o grado de resistencia ofrecida por la impedancia a la penetración de raíces y la presencia o no de discontinuidades o grietas tanto en el plano horizontal como vertical. Respecto a los factores condicionantes relacionados con las plantas deben considerarse la profundidad del sistema radical y el tipo de sistema radical.

El rol de las líneas de piedra como impedancia para el desarrollo radicular ha sido poco evaluado. Hidalgo Ochoa (1999) efectuó observaciones sobre la presencia de raíces de la vegetación natural de bosque seco tropical en suelos desarrollados en rocas del macizo Guayanés (Estado Bolívar, Venezuela) con líneas de piedra constituidas por fragmentos de cuarzo y nódulos de hierro, de unos 20 cm de espesor promedio, y localizadas dentro de los 150 cm de profundidad. El autor menciona que por encima de dicha capa existen pocas raíces de tamaño fino y muy fino, las cuales excepcionalmente son comunes. En el estrato de piedras existen muy pocas raíces finas y muy finas o no se presentan cuando el porcentaje de piedras es superior al 70-80% en volumen. Por debajo de la línea de piedras por lo general hay muy pocas raíces o bien no hay.

En el caso de los suelos de Misiones, se ha observado que las raíces de plantas arbóreas o pastos naturales cambian abruptamente de dirección y se desarrollan de manera horizontal en el contacto con los dos tipos de línea de piedras identificadas, en tanto la proporción de raíces disminuye abruptamente por debajo de ellas **Figura 8A** . El efecto restrictivo para la penetración de las raíces generando su desarrollo horizontal en el contacto con la capa impedante se ha constatado también claramente en plantas de pino jóvenes creciendo en un suelo rojo erosionado y con horizontes de cuarzo cercanos a la superficie **Figura 8B** . Más allá de las diversas observaciones que hemos realizado, el grado de impedancia de estos horizontes pedregosos de Misiones y sus eventuales consecuencias en el desarrollo vegetal son por el momento desconocidos. Tal como sugieren esas observaciones, puede presumirse que los horizontes nodulares representan un impedimento relativamente menor en comparación con los horizontes silíceos. Estos últimos se presentan como planchas continuas de gran dureza; pueden tener pocos milímetros de espesor y eventualmente estar fracturados, o bien decenas de centímetros y presentarse como masas sólidas y coherentes. Sin embargo, una característica heredada de su origen como venas cuarzosas en la roca madre basáltica, es el hecho de presentarse en los perfiles de suelo como capas paralelas superpuestas. De este modo, aun siendo muy delgados y tener algún grado de meteorización, un conjunto de dos o más horizontes silíceos habrá de constituir un impedimento fuertemente restrictivo para la penetración de raíces. En sentido contrario, estos horizontes suelen encontrarse profundos en muchos perfiles, en muchos casos no guardan horizontalidad, pueden tener ángulos de buzamiento importantes, su morfología es muy variada, con soluciones de continuidad en cortas distancias, todo lo cual ofrece alternativas para la exploración radical.

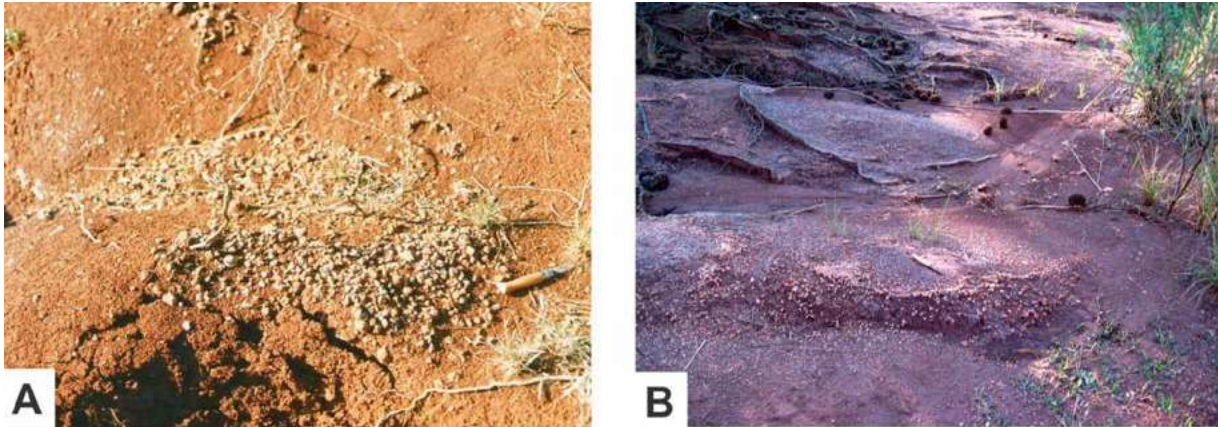








Figura 8A: Sitio M38 (26° 52' 06" S; 54° 22' 42" O). Vista de un horizonte nodular expuesto en superficie. Nótese como las raíces presentan direcciones horizontales en el contacto con el nivel impediante, como así también disminuyen considerablemente en cantidad por debajo del mismo. **B:** Sitio M11 (27° 05' 18" S; 54° 51' 10" O). Sector donde aflora en superficie un horizonte síliceo expuesto por erosión. Se observa como las raíces de pino se desarrollan de manera horizontal por encima de este horizonte.

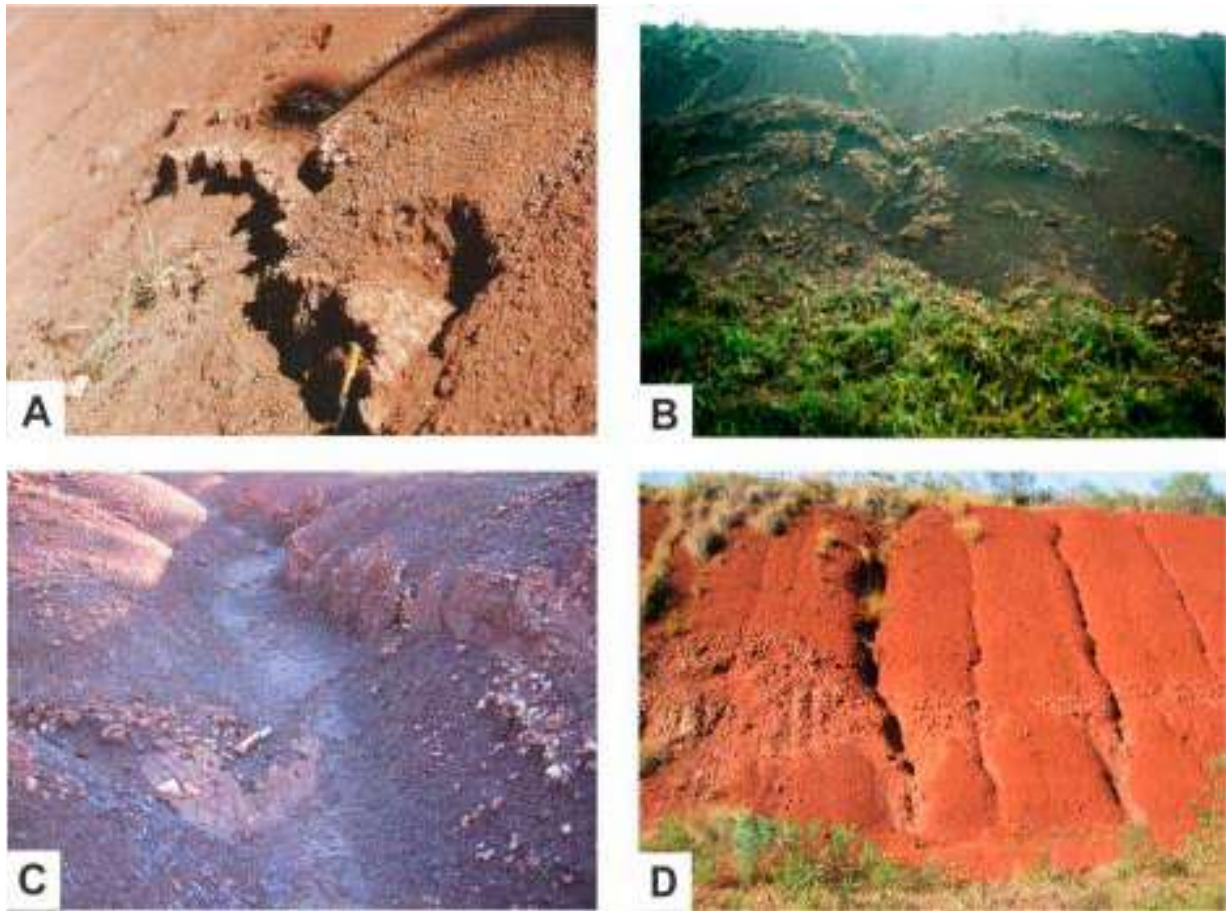
Figure 8A: Site M38 (26° 52' 06" S; 54° 22' 42" W). View of a nodular horizon exposed on surface. Note that the roots have horizontal directions in contact with the impedance level, as well as decreasing considerably in quantity below it. **B:** Site M11 (27° 05' 18" S; 54° 51' 10" W). Sector where a siliceous horizon appears on the surface, exposed by erosion. Observe how the pine roots develop horizontally above this horizon.

Implicancias de los horizontes pedregosos en la dinámica hídrica

De manera general, y así como ocurre con los suelos pedregosos, puede especularse que la presencia de "horizontes pedregosos" (líneas de piedra) en el suelo pueda tener consecuencias tanto favorables como desfavorables en sus propiedades físicas y químicas. Para los suelos pedregosos esto depende, entre otras variables, de la posición (superficial, parcialmente enterradas, dentro del suelo), del contenido de piedras (volumen ocupado) y de las características de las mismas (tamaño, forma, composición, porosidad) (López Falcón, 1999).

Para el caso de las líneas de piedra de Misiones y desde el punto de vista de la dinámica hídrica, un primer factor que ha de jugar será la profundidad a la que se encuentren en el suelo, lo que determinará tanto la percolación como la cantidad de agua almacenada. En suelo de la **Figura 7A**  y **7B**  la línea de piedra se encuentra a pocos centímetros de la superficie. En este caso se trata de una gruesa vena relicta de sílice cuya alta resistencia a la meteorización es sin duda causa del desarrollo muy somero del suelo. Además de la clara impedancia para el desarrollo radicular, este nivel casi impermeable -salvo a través de fisuras y discontinuidades- constituye un elemento de control del flujo hídrico, que tendrá aquí un movimiento lateral predominante. El destape de un horizonte cuarzoso como el que se presenta en la **Figura 9A**  pone en evidencia su carácter de capa coherente continua -más allá de pequeñas fracturas, posiblemente más abundantes en el borde expuesto- y sugiere también su rol como control del flujo hídrico.

Un segundo factor será la morfología del horizonte pedregoso en términos de desarrollo lateral y también de espesor. Si bien en muchos casos estos niveles observados en cortes de rutas conservan una cierta horizontalidad por decenas de metros, es común que presenten cambios de dirección con orientaciones subverticales, formas irregulares, muchas veces abovedadas, y con espesores variables. Estas irregularidades se presentan tanto en los horizontes nodulares **Figura 9D**  como en los horizontes síliceos **Figura 9B**  y **9C** .








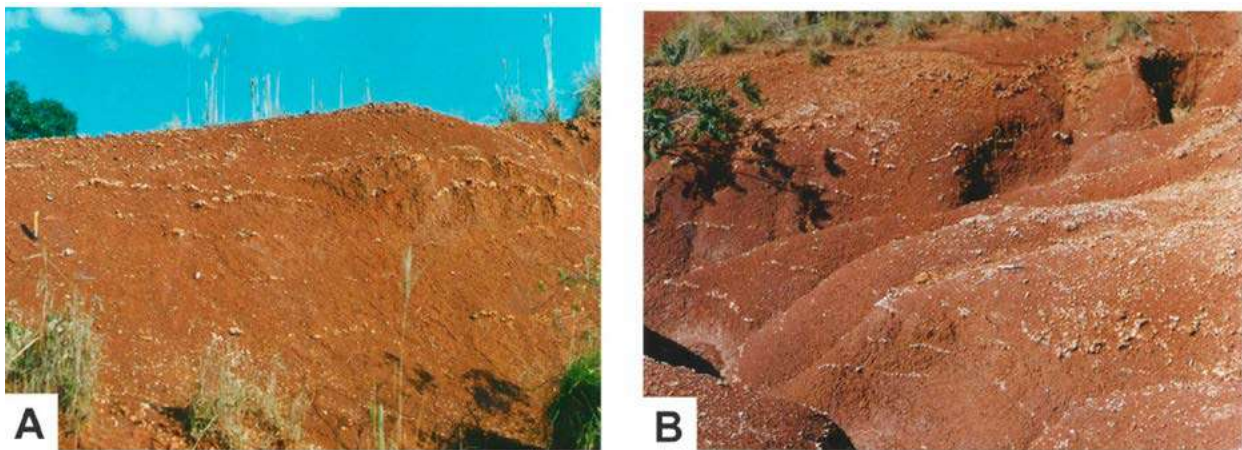
* 1

* 2

Figura 9A: Perfil M5 (27° 23' 16" S; 55° 03' 49" O). Destape de un horizonte síliceo de forma ondulada donde se observa el carácter masivo y continuo del mismo. **B:** Perfil M9 (27° 05' 44" S; 54° 52' 16" O). Desarrollo de numerosos horizontes síliceos de morfología ondulada. **C:** Sitio M11 (27° 05' 18" S; 54° 51' 10" O) Vista de un delgado horizonte cuarzo fragmentado de dirección subvertical que ha sido expuesto por erosión. **D:** Perfil M32 (27° 03' 33" S; 54° 44' 08" O) Perfil con desarrollo de horizonte nodular de morfología ondulada.

Figure 9A: Profile M5 (27° 23' 16" S; 55° 03' 49" W). Exposure of a continuous and massive siliceous horizon of undulating shape. **B:** Profile M9 (27° 05' 44" S; 54° 52' 16" O). Development of numerous siliceous horizons of undulating morphology. **C:** Site M11 (27° 05' 18" S; 54° 51' 10" W). View of a thin fragmented quartz horizon of subvertical direction that has been exposed by erosion. **D:** Profile M32 (27° 03' 33" S; 54° 44' 08" W). Profile with a nodular horizon of undulating morphology.

Un tercer factor determinante de influencia de los horizontes pedregosos en la dinámica hídrica de los suelos será su naturaleza o composición. Así, puede considerarse que los horizontes nodulares ferruginosos, aun cuando sean espesos, son permeables y juegan sobre todo en la disminución de la velocidad de percolación del agua. En muchos casos, por debajo de estos horizontes nodulares se observan horizontes Bw de un cierto espesor y diferenciados del saprolito **Figura 3A** , **4C**  y **6C** . Por el contrario, los horizontes síliceos serían más limitantes del flujo vertical, aun cuando esto dependería de su espesor. En el caso de venas delgadas, el alto grado de meteorización que ha conducido al desarrollo de estos suelos rojos ha producido también la disolución del cuarzo, permitiendo la edafización de los niveles subyacentes a esas venas **Figura 10A** . Los estudios microscópicos de suelos de Misiones han puesto claramente en evidencia estos procesos de alteración y la disolución de los granos de cuarzo en función de la profundidad (Morrás *et al.*, 2009; Moretti & Morrás, 2013). Por el contrario, los horizontes síliceos espesos se encuentran en general sobreyaciendo directamente sobre material saprolitizado menos evolucionado **Figura 7A** , lo que indica su menor permeabilidad y su efecto de barrera para el desarrollo vertical del solum.



* 1

* 2

Figura 10: Sitio M38 (26° 52' 06" S; 54° 22' 42" O). **A:** Perfil con numerosas venas horizontales de cuarzo. El poco espesor de las venas habría favorecido los procesos de disolución del cuarzo y desarrollo del suelo entre y por debajo de las mismas. **B:** Sector fuertemente erosionado donde afloran las venas de cuarzo.

Figure 10: Site M38 (26° 52' 06" S; 54° 22' 42" W). **A:** Profile with numerous horizontal quartz veins. The thinness of the veins would have promoted the processes of quartz dissolution and the development of the soil between and below them. **B:** A strongly eroded sector, where the quartz veins arise on the surface.

Finalmente, un cuarto factor que ha de jugar en el flujo hídrico es la presencia de uno o varios horizontes de piedra superpuestos. De acuerdo a la literatura, en los suelos de diversas latitudes por lo general sólo se desarrolla una línea de piedra (Gutiérrez Elorza, 2001); sin embargo, en Misiones, y como se mencionó anteriormente, es común la existencia de perfiles con varios horizontes pedregosos sucesivos. En estos casos, y en relación con la superposición frecuentemente observada de coladas de basalto masivo sobre coladas vesiculares con venas cuarzosas, suele presentarse en la parte superior del perfil uno o más horizontes nodulares, seguidos por uno o más horizontes silíceos. Sin dudas, en estos suelos con múltiples horizontes pedregosos la retención y flujo interno del agua presentarán comportamientos complejos y difícilmente mensurables.


Implicancias de los horizontes pedregosos en los procesos erosivos

La erosión de suelos en Misiones ha sido señalada y estudiada desde hace tiempo por diversos autores (Grüner, 1955; Mancini *et al.*, 1964; Laserre & Ríos, 1983; Fernández *et al.*, 2015). El riesgo de erosión de suelos en gran parte de la provincia es elevado debido al relieve ondulado, con fuertes pendientes, así como a sistemas de manejo agrícola de los suelos que promueven la degradación y consecuente erosión (Morrás, 2018). Sin embargo, hasta el presente no se ha considerado el eventual rol de los horizontes pedregosos en los procesos erosivos, lo que se hallaría vinculado con la influencia de estos horizontes en los flujos hídricos.

En principio, el riesgo de erosión se encuentra directamente relacionado con las propiedades hidrológicas del suelo, lo que depende de la porosidad y esto a su vez está relacionado con la granulometría y estructura. Por otro lado, diversos autores han mostrado también la importancia de la pedregosidad dentro del cuerpo del suelo para mejorar las condiciones de infiltración, redistribución y almacenamiento de agua dentro del perfil, reduciendo el escurrimiento y disminuyendo en consecuencia el arrastre y pérdida de suelo (Poesen & Lavee, 1994; Delgado Espinoza, 1999). En el caso de los suelos rojos de Misiones la capacidad de infiltración es muy elevada (Barbaro, 2017) lo cual -a pesar de la textura arcillo-

sa- se encontraría relacionado con el efecto agregante de los óxidos de hierro libre que caracterizan estos suelos (Leiva, 1997; Leiva *et al.*, 1998). La presencia de horizontes nodulares en estos suelos puede presumirse que actúa tal como los fragmentos de roca, contribuyendo en consecuencia a la percolación y así disminuyendo el riesgo de erosión.

Una situación diferente ocurriría con los horizontes silíceos debido a su relativa impermeabilidad; por otro lado, podría especularse que las implicancias serían diferenciadas en función de la profundidad a la que se encuentre dicha capa. En el caso que el horizonte silíceo se presente en profundidad, probablemente podría contribuir a mantener un cierto almacenaje de agua en el perfil. Por el contrario, si se presenta cercano a la superficie probablemente influya en una rápida saturación del suelo, dando lugar a la circulación lateral hipodérmica del agua, a la generación de escurrimiento superficial, y consecuentemente al desarrollo de procesos erosivos. En este sentido, Demangeot (1969) señala que los deslizamientos de terrenos constituyen uno de los procesos más importante en zonas tropicales húmedas, y que las condiciones de deslizamiento devienen óptimas cuando una capa de agua fluye sobre una roca dura y lisa. Así podría especularse que en Misiones la presencia de horizontes silíceos en vertientes -y también en cortes de rutas o excavaciones- podría contribuir a deslizamientos y colapsos de las mismas, influyendo en el modelado del paisaje.

El rol de los fragmentos gruesos en los procesos hidrológicos y erosivos es diferente cuando estos se presentan en la superficie del suelo. En estos casos la pedregosidad superficial tiene efectos sobre la interceptación del agua de lluvia, disminuyendo el impacto de la energía cinética de las gotas, reduciendo el sellado e incrementando la infiltración. También al aumentar la rugosidad superficial disminuirán la energía y velocidad del flujo de agua de escorrentía incrementando la infiltración *in situ*. En consecuencia, la existencia de piedras en la superficie del suelo, y dependiendo de su tamaño, forma, posición y grado de cobertura, actúa en suelos con pendiente disminuyendo los riesgos de erosión hídrica (Pla Sentis, 1999; Delgado Espinosa, 1999). En Misiones, en suelos fuertemente erosionados frecuentemente se observa que las líneas de piedra -tanto nodulares como silíceas- afloran **Figura 10B** *2. Debe considerarse entonces que las condiciones hidrológicas sobre estas nuevas superficies cambian, constituyendo las líneas de piedra aflorantes un nuevo control de la infiltración y del escurrimiento, y en consecuencia pudiendo actuar como factor de retardación (posiblemente en el caso de los horizontes nodulares) o de aceleramiento (en el caso de los horizontes silíceos) de los procesos erosivos.

■ CONSIDERACIONES FINALES

Las líneas de piedra se presentan en suelos de muy diversas regiones, aunque constituyen un rasgo característico de suelos tropicales y subtropicales muy meteorizados, y han merecido diferentes interpretaciones en cuanto a su origen. Gran parte de los trabajos pioneros del siglo XX fueron realizados por investigadores belgas y franceses en sus colonias de zonas tropicales, hecho por el cual la mayoría de las publicaciones se encuentran en idioma francés y no son lo suficientemente difundidas. Desde los primeros trabajos y hasta la actualidad, los diferentes aportes provenientes de diversas escuelas pueden enmarcarse en líneas generales como interpretaciones de génesis aloctonista o autoctonista. En nuestro país -para el caso de la provincia de Misiones y zonas aledañas- si bien las líneas de piedra fueron interpretadas por algunos autores como de origen sedimentario o biogénico, estudios recientes llevados a cabo por los autores de este capítulo demostraron que son generadas *in situ* a partir de la meteorización

de la roca basáltica. En este sentido, y de acuerdo con su génesis y morfología, las consideramos como horizontes.

Por otro lado, si bien no se cuenta con información suficiente acerca del efecto de estos horizontes en el desarrollo de las plantas y en los procesos hidrológicos y erosivos, las observaciones realizadas en el campo y las inferencias a partir de los datos obtenidos permiten estimar que su rol es importante, aunque diferenciado según una serie de variables aquí consideradas. Así, si bien hasta hace poco estos horizontes pedregosos del noreste del país han sido ignorados en los trabajos edafológicos, agronómicos, geomorfológicos y ambientales, los resultados e interpretaciones recientes sobre su génesis e implicancias ofrecen ya una base de conocimiento importante y sugieren el interés de profundizar aún mucho más el estudio de los mismos.

■ BIBLIOGRAFÍA

- Aubert, G & P Ségalen. 1966. Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., V (4): 97-112.
- Barbaro, S. 2017. Estado de degradación de Ultisoles bajo diferentes sistemas de control de malezas en cultivos de Yerba Mate en Misiones. Tesis de Magister, Escuela de Posgrado, Facultad de Agronomía, UBA, 129 p.
- Braucher, R, Bourlès, D, Colin, F, Brown, E & B Boulangé. 1998-a. Brazilian laterite dynamics using *in situ*-produced ^{10}Be . *Earth and Planetary Science Letters*, 163: 197-205.
- Braucher, R, Colin, F, Brown, E, Bourlès, D, Bamba, O, Raisbeck, G, Yiou, F & J Koud. 1998-b. African laterite dynamics using *in situ*-produced ^{10}Be . *Geochimica et Cosmochimica. Acta* 62 (9): 1501-1507.
- Braucher, R, Lima, C, Bourlès, D, Gaspar, J & M Assad. 2004. Stone-line formation processes documented by *in situ*-produced ^{10}Be distribution, Jardim River basin, DF, Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 645-651.
- Brown, D, Mc Sweeney, K & P Helmke. 2004. Statical, geochemical analyses of stone line formation in Uganda. *Geomorphology*, 62: 217-237.
- C.P.C.S. 1967. Classification des sols. Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Grignon, 87 p.
- Chatelin, Y & D Martin, D. 1972. Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM*, sér. Pédol., V (10) n° 1: 25-43.
- Chauvel, A, Boulet, R, Join, P & G Bocquier. G. 1983. Aluminium and iron oxi-hydroxide segregation in nodules developed on Tertiary sediments (Barreiras Group), near Manaus (Amazon basin), Brazil. In: Melfi, A. and Carvalho, A., (Eds.), *Laterisation Processes*, University of Sao Paulo, pp. 505-526.
- Collinet, J. 1969. Contribution à l' étude des "stone-lines" dans la région du Moyeb-Ogooué (Gabon). *Cah. ORSTOM*, Sér. Pédol., 7: 3-42.
- De Heinzelin, J. 1955. Observations sur la genèse des nappes de gravats dans les sols tropicaux. Publ. De l'INEAC. Sér. Sci. 64, Bruxelles, 37 p.
- De Oliveira, M, Formoso, M, Trescases, J & A Meunier. 1998. Clay mineral facies and lateritization in basalts of southeastern Parana Basin, Brasil. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(4): 365-377.
- Delgado Espinoza, F. 1999. Impacto de la pedregosidad en algunas cualidades de los suelos de Tierras Altas de Venezuela. En: Suelos pedregosos. López Falcón, R & F Delgado Espinosa (Eds.). CIDIAT, Serie Suelos y Clima SC-74, Mérida, Venezuela, p.117-130.
- Demangeot, J. 1969. Les milieux naturels tropicaux. Les cours de Sorbonne, Centre de Documentation Universitaire, Paris, 145 p.
- FAO-UNESCO. 1988. Soil map of the world. Revised legend. World Resources Report 60, FAO, Rome. Reprinted as Technical Paper 20, ISRIC, Wageningen, 1989.
- Fernández, R, Sosa, D, Pahr, N, von Wallis, A, Barbaro, S & S Albarracín. 2015. Provincia de Misiones. En: El deterioro del ambiente en la Argentina. Tomo 2. Casas, R & G Albarracín (Eds.). FECIC-Fundación Ciencia, Educación y Cultura, Buenos Aires, p. 187-200.

- Grüner, G. 1955. La erosión en Misiones. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Buenos Aires. Publicación Miscelánea n° 141 (reimpresión), 70 p.
- Gutiérrez Elorza, M. 2001. Geomorfología climática. Ediciones Omega S.A., Barcelona, España, 642 p.
- Hidalgo Ochoa, R. 1999. Consideraciones sobre la ocurrencia de líneas de piedras en algunos suelos del Macizo Guayanés, El Palmar, Estado Bolívar. En: Suelos pedregosos. López Falcón, R & F Delgado Espinosa (Eds.). CIDIAT, Serie Suelos y Clima SC-74, Mérida, Venezuela, p 93-100.
- Iriondo, M & D Kröhling. 1997. The tropical loess. Proc. 30th International Geological Congress, (An Zhisheng *et al.*, Eds.), Vol. 21, p. 61-77.
- Iriondo, M & D Kröhling. 2004. The parent material as the dominant factor in Holocene pedogenesis in the Uruguay River basin. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(1): 175-184.
- Iriondo, M, Kröhling, D & O Orfeo. 1997. La Formación Oberá, un Sedimento Eólico Tropical. Memorias del I Congreso Latinoamericano de Sedimentología, Sociedad Venezolana de Geólogos. Tomo I, pp. 343-348.
- Johnson, D. 1993. Dynamic denudation evolution of tropical, subtropical and temperate landscapes with three tiered soils: toward a general theory of landscape evolution. *Quaternary International*, 17: 67-78.
- Johnson, D & C Balek. 1991. The genesis of quaternary landscapes with stone-lines. *Physical Geography*, 12: 385-395.
- Johnson, D, Domier, J & D Johnson. 2005-a. Reflections on the nature of soil and its biomantle. *Annals of the Association of American Geographers*, 95 (1): 11-31.
- Johnson, D, Domier, J & D Johnson. 2005-b. Animating the biodynamics of soil thickness using process vector analysis: a dynamic denudation approach to soil formation. *Geomorphology*, 67: 23-46.
- Kaloga, B. 1976. Contribution à l'étude du cuirassement: relations entre les gravillons ferrugineux et leurs matériaux d'emballage. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, V(14) n° 4: 299-319.
- Kellogg, C & F Davol. 1949. An exploratory study of soil groups in the Belgian Congo. Publ. de l' INEAC, Sér. Sci. 46, Bruxelles, 73 p.
- Kröhling, D & M Iriondo. 2010. Comment on "Genesis of subtropical soils with stony horizons in NE Argentina: Autochthony and polygenesis" by Morrás *et al.* *Quaternary International*, 227: 190-192.
- Lanfranchi, R & D Schwartz. 1991. Les remaniements de sols pendant le Quaternaire supérieur au Congo. Évolution des paysages dans la région de la Sangha. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, V (26) n° 1: 11-24.
- Laporte, G. 1962. Reconnaissance pédologique le long de la voie ferrée COMILOG. ORSTOM-IRSC 149 p, multi.
- Laserre, S & M Ríos. 1983. Evaluación de los recursos de suelos del área de frontera de la Provincia de Misiones. INTA-EEA Corrientes, 69 p.
- Lecomte, P. 1988. Stone line profiles: Importance in geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 30: 35-61.
- Leiva, E. 1997. Dinámica del hierro y su rol como factor de agregación en un Ultisol de Misiones bajo diferentes manejos. Tesis de Magister, Escuela de Posgrado, Facultad de Agronomía, UBA, 154 p.
- Leiva, E, Morrás, H & T Thiele. 1998. Distribución del hierro libre y total en un Ultisol de Misiones bajo tres condiciones de manejo. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Carlos Paz, pp.143-144.
- Lévêque, A. 1969. Le problème des sols a nappes de gravats. Observations et réflexions préliminaires pour le socle granito-gneissique au Togo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VII, n° 1: 43-69.
- Lévêque, A. 1970. L'origine de concrétions ferrugineuses dans les sols du socle granito-gneissique au Togo. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VIII, n° 3: 321-348.
- Ligier, H, Mattelo, H, Polo, H & J Rosso. 1990. Provincia de Misiones, escala 1:500.000. En: Atlas de Suelos de la República Argentina. SAGyP-INTA, p. 109-154.
- López Falcón, R. 1999. Suelos pedregosos. Características que afectan la calidad edáfica. Importancia y conocimiento en Venezuela. En: Suelos pedregosos. López Falcón, R & F Delgado Espinosa (Eds.). CIDIAT, Serie Suelos y Clima SC-74, Mérida, Venezuela, p. 1-18.
- Mancini, F, Sanesi, G & S Lasserre. 1964. Provincia de Misiones. Informe edafológico. Compañía Argentina de Relevamientos Topográficos y Aerofotogramétricos (CARTA), Buenos Aires, 191 p.
- Marengo, H, Palma, Y, Tchilingurian, P, Helms, F, Kruck, W & D Roverano. 2005. Geología del área de San Ignacio, Provincia de Misiones. Actas XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Vol. I, p. 141-148.

- Milne, G. 1936. Normal erosion as a factor in soil profile development. *Nature*, 138:548-549.
- Moretti, L & H Morrás. 2012. Nuevas evidencias micromorfológicas de la autoctonía del manto ferralítico de la Provincia de Misiones. Actas V Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Río Cuarto, Córdoba, p. 148-149.
- Moretti, L & H Morrás. 2013. New microscopic evidences of the autochthony of the ferrallitic pedological mantle in Misiones, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, Vol. 20(2), p. 129-142.
- Moretti, L, Morrás, H, Píccolo, G & W Zech. 2006. Origen y evolución paleoclimática del manto ferralítico de la Provincia de Misiones. Actas III Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Córdoba, p. 753-762.
- Morrás, H. 2018. Dinámica estructural de un Ultisol con distintos manejos del cultivo de la Yerba mate, Misiones (Esta Obra).
- Morrás, H, Moretti, L, Píccolo, G & W Zech. 2005. Nueva hipótesis acerca del origen de las líneas de piedras y horizontes estructurados subsuperficiales en los suelos ferralíticos de Misiones, Argentina. XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, vol. 5, p. 97-102.
- Morrás, H, Moretti, L, Píccolo, G & W Zech. 2006. Stone lines and weathering profiles of ferrallitic soils in northeastern Argentina". *New Waves in Physical Land Resources*. D. Langouche & E. Van Ranst (eds.). International Centre for Physical Land Resources, Rijksuniversiteit Gent, Bélgica, pp. 269-280.
- Morrás, H, Moretti, L, Píccolo, G & W Zech. 2009. Genesis of subtropical soils with stony horizons in NE Argentina: Autochthony and polygenesis. *Quaternary International*, 196: 137-159.
- Morrás, H, Moretti, L, Píccolo, G & W Zech. 2010. A reply to D. Kröhling & M. Iriondo's comment on "Genesis of subtropical soils with stony horizons in NE Argentina: Autochthony and polygenesis" by Morrás et al. *Quaternary International* 227: 193-195.
- Müller, D, Bocquier, G, Nahon, D & H Pacquet. 1981. Analyse des différenciations minéralogiques et structurales d'un sol ferrallitique à horizons nodulaires du Congo, *Cahier O.R.S.T.O.M. Série Pédologie* 18, p. 87-109.
- Nahon, D. 1991. Introduction to the petrology of soils and chemical weathering. John Wiley & Sons, New York, USA, 313 p.
- Nye, P. 1955. Some soil-forming processes in the humid tropics. IV. The action of soil fauna. *Journal of Soil Science*, 6: 73-83.
- Parizek, E & J Woodruff. 1957. Description and origin of stone layers in soils of the southeastern states. *Journal of Geology*, 65: 24-34.
- Pla Sentís, I. 1999. Características y propiedades de suelos pedregosos. En: Suelos pedregosos. López Falcón, R & F Delgado Espinosa (Eds.). CIDIAT, Serie Suelos y Clima SC-74, Mérida, Venezuela, pp. 33-40.
- Poesen, J & H Lavee. 1994. Rock fragments in top soil: significance and processes. *Catena*, 23: 1-28.
- Prado, H. 2003. Solos do Brasil. Gênese, morfologia, classificação, levantamento, manejo. 3 ed. rev. e ampl., Piracicaba, SP, 275 p.
- Riggi, J & N Riggi. 1964. Meteorización de basaltos en Misiones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. XIX (1): 57-70.
- Riquier, J. 1969. Contribution a l'étude des stone lines en régions tropicale et équatoriale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VII, n° 1, p. 71-110.
- Ruhe, R & J Cady. 1954. Latosolic soils on central African interior high plateaus. Transactions International Congress of Soil Science, 5th Congress, 4: 401-407.
- Ruhe, R & R Daniels. 1958. Soils, paleosols, and soil-horizon nomenclature. *Soil Science Society of American Proceedings*, 22: 66-69.
- Ruhe, R. 1956. Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Science*, 82: 441-455.
- Ruhe, R. 1959. Stone lines in soils. *Soil Science*, 87 (4): 223-231.
- Sanesi, G. 1965. I suoli di Misiones. Academia Italiana di Scienze Forestali, 343 p.
- Schaetzl, R & M Thompson. 2015. Soils: Genesis and geomorphology. Second Edition. Cambridge University Press, New York, USA, 778 p.

- Schenato, F, Formoso, M, Dudoignon, P, Meunier, A, Proust, D & A Mas. 2003. Alteration processes of a thick basaltic lava flow of the Paraná Basin (Brazil): petrographic and mineralogical studies. *Journal of South American Earth Sciences*, 16: 423-444.
- Ségalen, P, Fauck, R, Lamouroux, M, Perraud, A, Quantin, P, Roederer, P & J Vieillefon. 1979. Project de classification des sols. ORSTOM, miméo 301 p.
- Ségalen, P. 1969. Le remaniement des sols et la mise en place de la stone-line en Afrique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. VII, n° 1: 113-127.
- Ségalen, P. 1994. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Orstom Éditions, Paris, Tome 1, 198 p.
- Sharpe, C. 1938. Landslides and related phenomena. Columbia University Press, New York, 137 p.
- Singer, M. 2006. Physical degradation of soils. En: Soils. Basic concepts and future challenges. Certini, G. & R. Scalenghe (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 224-234.
- Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy : A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA-SCS, Agriculture Handbook Number 436, 754 p.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second edition. USDA-NRCS, Agriculture Handbook Number 436, 869 p.
- Stoops, G. 1967. Le profil d'alteration au Bas-Congo (Kinshasa). Sa description et sa genèse. *Pédologie*, XVII (1): 60-105.
- Stoops, G. 1989. Contribution of *in situ* transformations to the formation of stone-layer complexes in Central Africa. *Geo-Eco-Trop*, 11 (1-4): 139-149.
- Stoops, G. 2015. Análisis de la contextura de la masa basal mineral y de los rasgos edáficos del suelo. En: Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias. Loaiza, J, Stoops, G, Poch, R & M Casamitjana (Eds.). Editorial Pascual Bravo, Medellín, Colombia, p. 87-153.
- Sys, C. 1960. Principles of soil classification in the Belgian Congo. International Congress of Soil Science, 7, Madison, vol. IV, p.112-118.
- Taboada, M & C Álvarez. 2008. Introducción a la fertilidad física de los suelos. En: Fertilidad física de suelos. Taboada, M & C Álvarez (Eds.). Editorial Facultad de Agronomía, UBA, Buenos Aires, pp. 1-8.
- Taboada, M, Micucci, F & C Álvarez. 2008. Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. En: Fertilidad física de suelos. Taboada, M & C Álvarez (Eds.). Editorial Facultad de Agronomía, UBA, Buenos Aires, p. 94-154.
- Tandarich, J, Darmody, R, Follmer, L & L Johnson. 2002. Historical Development of Soil and Weathering Profile Concepts from Europe to the United States of America. *Soil Science Society of American Journal*, 66: 335-346.
- Watson, J. 1961. Some observations on soils horizons and insect activity in granite soils. First Federal Science Congress Proceedings, 1960, Salisbury, Southern Rhodesia, vol. 1, p. 271-276.