

Evidencias macromorfológicas y micromorfológicas de paleosuelos en el desierto de La Tatacoa y su variación sincrónica

✉ María Teresa Flórez-Molina^{1,*}, ✉ Luis Norberto Parra-Sánchez¹,
✉ Daniel Francisco Jaramillo-Jaramillo², ✉ José María Jaramillo-Mejía³

¹ Facultad de Ingeniería, Departamento de Materiales, Grupo GAIA, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

² Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

³ Gmas, Bogotá, D. C., Colombia

Resumen

Se estudiaron los conjuntos de capas rojas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia, con el fin de comprobar la presencia de paleosuelos en ellas y de establecer sus propiedades y variabilidad espacial, así como las condiciones ambientales bajo las cuales se formaron. Se comprobó la existencia de paleosuelos alcalinos en las capas rojas inferiores y en las ferruginosas con las siguientes características: horizontes iluviales Bt de color rojo, con estructura en bloques angulares, bajo contenido de materia orgánica, cútanos y espejos de falla (*slickensides*), que mostraban translocación de óxidos de hierro y manganeso y de carbonatos de calcio. Además, se observó una gran variabilidad espacial en el espesor y la posición de los paleosuelos con respecto a los lechos líticos.

Los procesos pedogenéticos responsables de la evolución de los paleosuelos fueron la iluviación y la lixiviación de arcilla, la mineralización de la materia orgánica, la solodización, la rubefacción, la fersialitización, la carbonatación, el adensamiento y la erosión hídrica. Estos procesos indican que la pedogénesis se llevó a cabo en un clima estacional contrastado en humedad, con una época muy seca seguida de otra muy lluviosa.

La presencia de paleosuelos intercalados con capas líticas de granulometría variable sin pedogénesis implica que en la región se presentó una inestabilidad importante en las condiciones climáticas y geomorfológicas durante la época en que se formaron los conjuntos de capas rojas en el desierto.

Se concluyó que la liberación de hierro a partir de los minerales primarios y su difusión dentro de la matriz del material geológico, con su posterior oxidación, fue el mecanismo responsable del color dominante tanto de las capas rojas como de los paleosuelos del desierto de La Tatacoa. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Paleosuelos; Variación sincrónica; Pedogénesis; Macro y micromorfología; Capas rojas inferiores; Capas ferruginosas; Desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia.

Macromorphological and micromorphological evidence of the paleosols of La Tatacoa desert and its synchronic variation

Abstract

We studied the red layer assemblages of La Tatacoa desert in Huila, Colombia, in order to verify the presence of paleosols and to establish their properties and spatial variability, as well as the environmental conditions under which they were formed. We found alkaline paleosols in the lower red layers and in the ferruginous ones that had the following characteristics: illuvial horizons Bt of red color, with a structure in angular blocks, low content of organic matter, cutans and slickensides that showed translocation of iron and manganese oxides and calcium carbonates. In addition, there was a strong spatial variability in the thickness and the position of the paleosols with respect to the lithic beds.

The pedogenetic processes responsible for the evolution of the paleosols were clay illuviation and lessivage, mineralization of organic matter, solodization, flushing, fersialitization, carbonation, aeration, and water erosion. These processes indicate that the pedogenesis occurred in a seasonal climate contrasted in humidity with a very dry season followed by another very rainy one.

The presence of paleosols interspersed with lithic layers of variable granulometry without pedogenesis imply that there was significant instability in the climatic and geomorphological conditions in the region during the time when the sets of red layers in the desert were formed.

We concluded that the release of iron from the primary minerals and their diffusion within the matrix of the geological material and its subsequent oxidation was the mechanism responsible for the dominant color of both the red layers and the paleosols of La Tatacoa desert. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Paleosols; Synchronous variation; Pedogénesis; Macro and micromorphology; Lower red bed; Ferruginous bed; La Tatacoa desert, Huila, Colombia.

*Correspondencia:

María Teresa Flórez-Molina; maria.florez@udea.edu.co; **Recibido:** 20 de julio de 2018; **Aceptado:** 27 de noviembre de 2018; **Editor:** Carlos Jaramillo

Introducción

En los depósitos sedimentarios superficiales de algunos paisajes terrestres de Colombia se han detectado paleosuelos que se han constituido en un valioso recurso para reconstruir ambientes de evolución geológico-geomorfológica de amplias regiones, especialmente en la tefrostratigrafía de sus cordilleras, debido a que conservan evidencias de los biomas del pasado y de las condiciones climáticas y de drenaje existentes en la época de su formación (Herd, 1982; Thouret, *et al.*, 1985; Salomons, 1989; Pulido, *et al.*, 1990; González, *et al.*, 1993; Flórez, 2000; Mantilla, *et al.*, 2011; Parra, 2016). En las rocas sedimentarias clásticas del Mioceno Superior del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia, Fields & Henao (1949), Henao (1950) y Fields (1959) describieron y cartografiaron tres conjuntos de capas rojizas de diferentes edades: capas rojas superiores (*upper red beds*), capas rojas inferiores (*lower red beds*) y arenisca ferruginosa (*ferruginous sandstone*). Dentro de estas capas se han detectado paleosuelos formados en condiciones de climas estacionales muy contrastados en humedad, incluso áridos, en paleorrelieves colinados de baja altitud y en planicies aluviales (Guerrero, 1994; Flórez, *et al.*, 2013; Parra, 2016), aunque Stirton (1953) negó su existencia.

La transformación climática ocurrida hacia mediados del Mioceno es una de las más importantes que ha sufrido el planeta y consta de un lapso cálido, una transición y un enfriamiento. Las rocas terciarias del desierto de La Tatacoa albergan una rica variedad de paleosuelos que cubren dicha transición climática, especialmente los paleosuelos del área de La Venta, cuya importancia internacional radica en que son indicadores de los climas imperantes en ella.

La inestabilidad climática que se presentó en el Mioceno pudo generar una amplia variedad de condiciones ambientales y espaciales en los procesos pedo-geomorfológicos que se desarrollaron específicamente en la cuenca del desierto de La Tatacoa, los cuales pudieron haber quedado registrados en sus paleosuelos, por lo que el presente estudio contribuye a determinar esas variaciones espaciales, tanto pedogenéticas como geomorfológicas, mediante el análisis sincrónico de las capas rojas, así como a mejorar el conocimiento paleoambiental del desierto mediante la interpretación de los rasgos pedológicos que se han preservado en los suelos y los análisis fisicoquímicos y mineralógicos realizados.

Antecedentes

Salazar, *et al.* (2017) y Sánchez, *et al.* (2017) estudiaron los paleosuelos de las capas rojas superiores del Miembro Cerro Colorado y calcularon la precipitación media anual (1300.00 ± 181.00 mm/año) y la temperatura media anual (20.00 ± 0.60 °C) reinantes durante su formación utilizando funciones del clima. Estos autores señalaron que la arcilla predominante en estos paleosuelos es la esmectita, presente en 50 % de su área, seguida de la dickita y la caolinita, cada una con un 22 %, y la ilita con un 6 %.

Parra (2016) hizo una comparación litoestratigráfica de las propuestas de Henao (1950), Fields (1959) y Guerrero (1994) y concluyó que el Grupo La Venta, Formación Villavieja, donde se encuentran las capas rojas, era una secuencia de sedimentos continentales de origen fluvial que se conformaron como un monoclinado suavemente buzante hacia el sureste (SE). Localmente, en distancias cortas, el monoclinado se vuelve casi horizontal simulando anticlinales y sinclinales poco conspicuos tal como se presenta en la Tabla 1. Se han preservado los nombres locales y tradicionales para las unidades. Este autor solo estableció la existencia de paleosuelos en la capa roja superior (Tabla 1).

En las capas rojas del desierto de La Tatacoa Flórez, *et al.* (2013) reconocieron dos conjuntos de paleosuelos que llamaron secuencia superior y secuencia inferior. La secuencia superior tenía un espesor de 16,15 m y se componía de tres fragmentos de paleosuelos; la secuencia inferior, con 14,50 m, también incluía tres fragmentos. La característica más sobresaliente de los paleosuelos encontrados en la secuencia inferior fue la coloración parda rojiza y parda rojiza oscura, mucho más intensa que en los paleosuelos de la secuencia superior.

Materiales y métodos

La zona de interés se localiza en el desierto de La Tatacoa, en los municipios de Baraya y Villavieja, Huila (Figura 1). Según los registros de la Universidad Surcolombiana - USCO (2005), el clima es semiárido ecuatorial y corresponde a las zonas de vida de bosque seco tropical (bs-T) y bosque muy seco tropical (bms-T).

Trabajo de campo. En campo se hicieron recorridos a lo largo de las capas rojas detectadas y después de su observación cuidadosa, se seleccionaron varios sitios (Figura 1) y se describieron sus características morfológicas siguiendo los protocolos establecidos por Schoeneberger, *et al.* (2002), Retallack (1988, 2001), Kraus (1999) y Nettleton, *et al.* (2000). Los suelos y paleosuelos encontrados se clasificaron a nivel de subgrupo según el Sistema Taxonómico de Clasificación de Suelos del U.S. Department of Agriculture (USDA) (Soil Survey Staff - SSS, 2014). Se tomaron fotografías y se hicieron los diagramas estratigráficos de todo lo descrito. Por último, se estableció la sección tipo de cada conjunto de capas rojas, y en cada una se muestreó el suelo para su caracterización detallada mediante determinaciones fisicoquímicas, mineralogía y micromorfología.

Propiedades evaluadas. En cada muestra de material se hicieron los siguientes estudios específicos.

Procesamiento en seco. Se secó al aire una parte húmeda y previamente pesada de cada muestra sobre una superficie de porcelana en un ambiente limpio y sin exceder los 25 °C. En cada parte se determinaron las pérdidas de humedad, las pérdidas por calcinación a 550 °C, el contenido de carbono orgánico total y se caracterizaron sus macrocomponentes visualizados con el estereoscopio.

Mineralogía. Mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) se evaluó la morfología de las partículas en

un equipo Jeol, modelo JSM-6300. Las muestras en polvo, previamente recubiertas con oro en un equipo previsto para ello (modelo Desk II), se colocaron en los portamuestras; se trabajó a 20 Kv, a igual distancia de trabajo y con acercamientos de 5.000, 2.500 y 1.000 X. La caracterización mineralógica de los paleosuelos muestreados se hizo en el Laboratorio GMAS SAS mediante difracción de rayos X con un difractor de rayos X Bruker D8 Advance Serie I, tanto en la fracción de arcilla como en un preparado en polvo impalpable del suelo total, muestras a las que se les adicionó un 5 % en peso de espato de fluorita como estándar. A la fracción de arcilla se le aplicaron los tratamientos de

glicolado y calentado, con lo cual se obtuvieron tres resultados por muestra (muestra secada al aire, muestra calentada a 550 °C y muestra tratada con glicol de etileno).

Análisis micromorfológico. Para el análisis micromorfológico se tomaron muestras en cada horizonte con un cilindro biselado de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura, que luego se cubrió con parafina por ambos lados marcando previamente el techo y la base para que no perdieran humedad. Las muestras se guardaron en bolsas plásticas y se enviaron al laboratorio de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en Bogotá donde se cortaron las secciones delgadas de suelos. Las placas pulidas se observaron con un

Tabla 1. Litoestratigrafía informal del Neógeno en el área de La Tatacoa

Parra (2016)		Henao (1950)		Guerrero (1993)			
Terrazas cuaternarias		Terrazas					
Mesetas pleistocenas		Abanicos aluviales					
Grupo La Venta	Formación Gigante		Formación Mesa		Formación Neiva		
	Formación Valla						
	Formación Mesitas		Techo de la serie Honda, serie Brown, secuencia Brown		Formación Villavieja	Miembro Cerro Colorado	Lecho rojo Polonia
	Formación Villavieja	Paleosuelo El Cardón	Lechos rojos superiores <i>Upper Red Beds</i>			El Cardón Red beds	Lechos de San Francisco
			<i>Intermediate Clays and Sandstone</i>				Unit Between
		Paleosuelos	<i>Lower Red Beds</i> <i>A clay member</i> "			La Venta Red Beds	
			<i>La Venta clays and Sandstone</i> "			Unit Between	
		Capa ferruginosa	<i>Ferruginous Sandstone</i> "			Ferruginous beds	
			Secuencia Gray Colored Sandstone And Brown Clays	Unit Above The Fish Bed"		Unit Above	
		Capa de peces		"ish Bed"		Capa de peces	
		Unit Below Fish Bed		Unidad por encima			
	Capa de monos	Monkey Unit		Capas de monos			
	Formación Cerbatana		Miembro Cerbatana Gravels and Clays	San Nicolás Clays	Formación La Victoria	Capas de conglomerados Cerbatana	
	Formación Victoria	Arcilla con nocilas	Unit Between				
		Areniscas Tatacoa	Tatacoa Sandt. Beds				
Areniscas Chunchull		Miembro Libano Clays And Sandstone		Unit Between			
Formación San Alfonso	Chunchullo Sandst beds						
		Unit Between					
		Cerro Gordo beds					
		Unit Below					
Grupo La Arenosa	Formación Igua		Secuencia Arenosa Sandstone and Siltstones"	Techo			
	Formación Los Hoyos			Medio			
	Formación Borrega			Base			
Formación Barzalosa o Espinalosa							

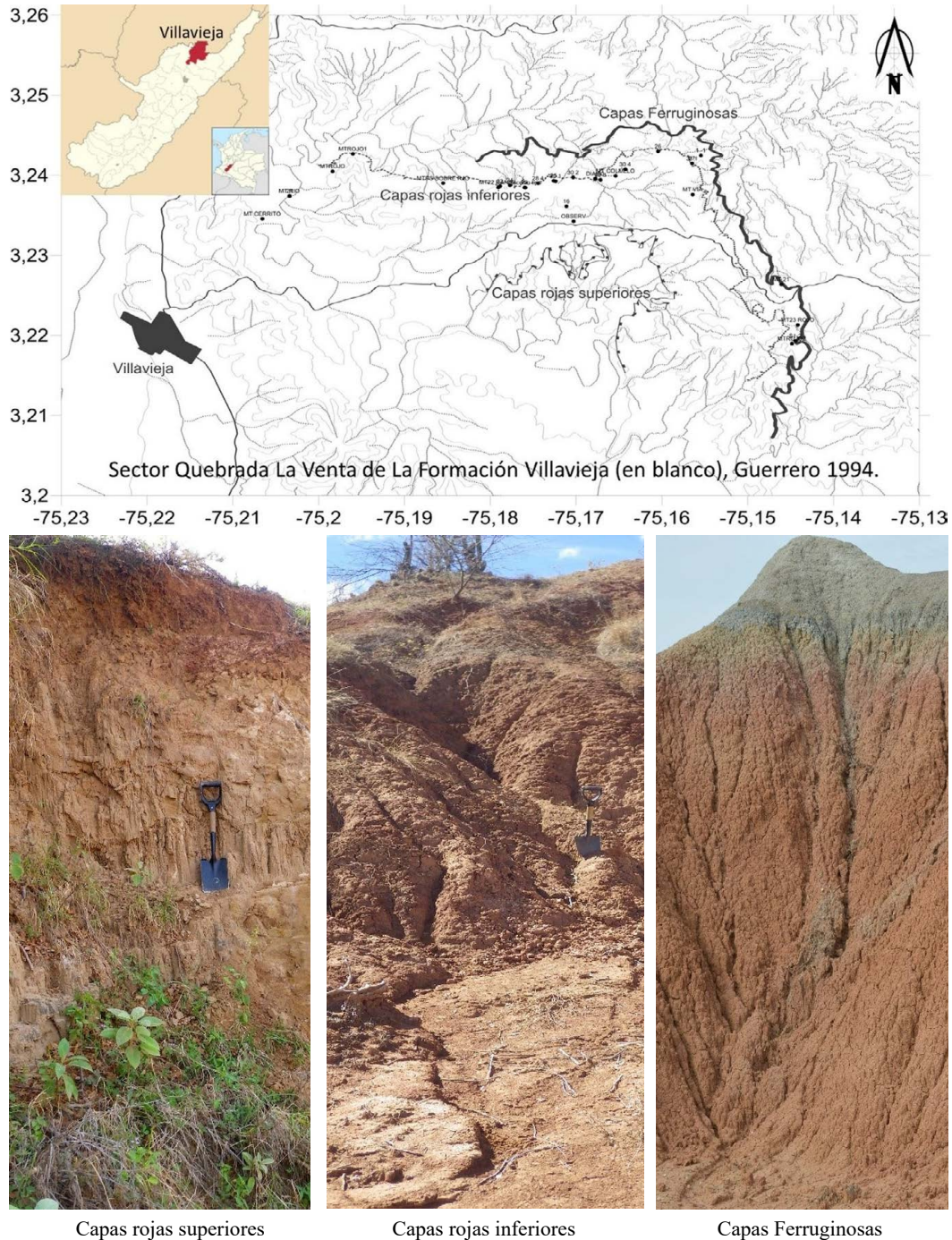


Figura 1. Localización de las capas rojas en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia, y aspecto general de los sitios donde se ubicaron las secciones tipo de los paleosuelos en cada una de ellas (Fotos de los autores)

microscopio óptico de luz polarizada Olympus y se fotografiaron barriendo su mayor área. Las descripciones comprendieron los componentes, la matriz y sus relaciones, los vacíos, el color y las características dominantes.

Análisis de pedocomponentes. Este análisis consiste en la detección y cuantificación de las asociaciones de los componentes microscópicos orgánicos, inorgánicos o biominerales presentes en el suelo, los cuales pueden emplearse

en la interpretación de condiciones ambientales específicas. En su conjunto, estos componentes representan un registro integral de los diversos agentes y procesos climáticos, geológicos, edáficos y biológicos que intervienen en el contexto de evolución del suelo. Una porción de la muestra húmeda se dispersó y se fraccionó para obtener las partículas entre 100 y 10 micrómetros que fueron clasificadas y contadas en un microscopio petrográfico.

Índices pedológicos. Se calcularon algunos índices que se relacionan con el grado de evolución de los suelos siguiendo la metodología planteada por Sedov, et al. (2001, 2009).

Índice de meteorización. A los paleosuelos de las secciones tipo se les calculó el índice de meteorización mediante la ecuación [1] de Parker (1970), en la que se considera la movilización de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

$$\text{WIP} = (\text{Na}^+/0,35 + \text{Mg}^{2+}/0,9 + \text{K}^+/0,25 + \text{Ca}^{2+}/0,7) \% \quad [1]$$

El índice de meteorización de Parker (*Weathering Index of Parker*, WIP) refleja la probabilidad de que un elemento sea movilizado en el proceso de meteorización y tiene un rango que varía de 0 a 100: valores de WIP cercanos a 0 indican mayor meteorización y cercanos a 100, menor efecto de la meteorización.

Índice de la relación limo-arcilla. Este se basa en el supuesto de que la fracción de limo de los paleosuelos consiste principalmente de minerales intemperizables y la fracción de arcilla representa el material secundario derivado del intemperismo del limo. En esta relación, los valores menores de 0,15 caracterizan los paleosuelos altamente intemperizados, bien desarrollados y generalmente muy antiguos, formados bajo condiciones de alta estabilidad del paisaje. En contraste, los valores mayores de 2 son indicativos de un reducido intemperismo y una escasa evolución del paleosuelo (Young, 1976; Van Wambeke, 1991).

Análisis sincrónico. Con todas las descripciones hechas en cada secuencia de capas rojas se hizo un análisis sincrónico considerando aspectos como la variación en el espesor de las capas líticas y los paleosuelos, en el desarrollo y la estabilidad pedogenética, el grado de intemperismo de los minerales primarios y las condiciones ambientales del sitio en las que se formaron.

Resultados

Pedoestratigrafía de los paleosuelos en la capa ferruginosa. La sección tipo de esta unidad se localiza a 500 metros de la vía que conduce del observatorio a “Los Pozos”, en la margen izquierda, coordenadas X: 03°14'18.5” y Y: 075°10'33.6” (Figuras 1 y 2).

En la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa se pueden reconocer tres horizontes de un paleosuelo que subyace bajo una discordancia erosiva. El paleosuelo descansa sobre una capa lítica de limos, muy dura, de color amarillo pálido. Los horizontes del paleosuelo son fuertemente arcillosos y alcalinos, tienen muy bajo contenido de materia orgánica, alto contenido de bases y de fósforo, gran capacidad efectiva de intercambio catiónico, no son deficientes en elementos menores y son sódicos (Tabla 2).

A continuación, se presenta la descripción de la sección tipo de las capas ferruginosas.

C 0,0 – 0,94 m: capa lítica arcillosa, color 5YR5/8 (rojo amarillento) con 20 % de color 5YR6/1 (gris) presente en forma de concentraciones filamentosas de arcilla que rellenaban grietas y fisuras. Sin estructura (masiva) y muy dura; plástica y pegajosa. Límite abrupto ondulado.

2C 0,94 – 1,07 m: capa lítica limo-arcillosa, color 5YR5/8 (rojo amarillento) con 30 % de color 5YR6/1 (gris) presente en forma de concentraciones filamentosas de arcilla que rellenaban grietas y fisuras. Sin estructura (masiva); dura; plástica, ligeramente pegajosa, con muchos poros finos y medios y límite abrupto irregular.

3Btn 1,07 – 1,36 m: color rojo (2.5YR4/6); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios y fuertes; duro, plástico, pegajoso, con muchos argilanes continuos y prominentes, pocos poros y raíces finas; presentaba algunas grietas verticales. pH 8,5, débil reacción al HCl y al H_2O_2 y algunos carbonatos concentrados en placas delgadas de hasta 1 mm. Límite gradual plano.

3Btknss₁ 1,36 – 1,86 m: color pardo rojizo (2.5YR4/4); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios y fuertes; plástico y pegajoso; argilanes comunes continuos y definidos; pocos poros y raíces finas. Presencia de espejos de falla estriados, bien definidos, y de grietas verticales. pH de 8,0; fuerte reacción al HCl y al H_2O_2 ; abundantes recubrimientos de manganeso. Límite gradual plano.

3Btknss₂ 1,86 – 2,16 m: color pardo rojizo (5YR4/4); arcilloso; estructura en bloques subangulares medios y fuertes; plástico y pegajoso; frecuentes manchas de óxidos de hierro y argilanes comunes continuos y definidos; pocos poros y raíces finas. Presencia de espejos de falla estriados, bien definidos, y grietas verticales. pH de 8,0; fuerte reacción al HCl y al H_2O_2 . Límite abrupto plano.

4C 2,16 – 3,10 m: capa lítica limosa de color 10YR6/6 (amarillo parduzco). Sin estructura (masiva), muy dura, ligeramente plástica y pegajosa.

Las características más sobresalientes de este paleosuelo fueron la coloración roja marcada por colores entre el pardo rojizo y el pardo rojizo oscuro, la textura arcillosa con estructura en bloques angulares, la presencia de frecuentes manchas de óxidos de hierro y argilanes comunes continuos, así como de espejos de falla bien definidos y grietas verticales.

Índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas. En la Tabla 3 se presentan los índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas descritas en el desierto de La Tatacoa. Los índices de las secuencias superior e inferior se establecieron con la información publicada por Flórez, et al. (2013).

Variación sincrónica de las capas rojas del desierto de La Tatacoa. Variación sincrónica de las capas rojas inferiores. Como ya se ha dicho, en las capas rojas se evidenciaron, por lo menos, seis paleosuelos, los cuales no se manifestaban en todos los perfiles a lo largo de la traza indicada en las Figuras 3a y 3b. La variación sincrónica de esta capa se estudió en detalle con el levantamiento de sus rasgos dominantes y su variación espacial y su agrupación en nueve perfiles pedoestratigráficos con base en la sección tipo denominada MT28-2ST ya descrita. A continuación, se describen los perfiles estudiados en los otros sitios.

Perfil 28-1. Con un espesor de 20,00 m, en él se evidenciaron tres paleosuelos que de techo a base se nombraron



Color	Estructura	Textura	pH	Espesor	Perfil
Rojo amarillento oscuro 5YR5/8 moteado de gris 5YR6/1 en un 80%			8,5	0-94 cm	C
Abigarrado entre rojo amarillento y gris 5YR5/8 - 5YR6/1	Seudo estructura o estructura con tendencia a bloques subangulares, medios, fuertes Muy duro		8,5	0-13 cm	2C
Rojo 2.5Y4/6 moteado de gris 5YR6/1	Bloques subangulares, fuertes, duros	Limo arenosa	8,6	13-42 cm	3Bt _n
Pardo rojizo 2.5Y4/4	Bloques subangulares, medios, firmes, fuertes	Arcillosa	8,7	42-92 cm	3Btknss ₁
Pardo rojizo 5Y4/4	Bloques subangulares, medios, firmes, fuertes	Arcillosa	8,5	92-122 cm	3Btknss ₂
Amarillo pajido 10YR6/6	Masivo, muy duro	Limo arenosa	8,3	122 cm y +	4C

Figura 2. Sección tipo y pedostratigrafía de la capa ferruginosa en el desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia

como 3Btss₁-3Btss₂, 5Bt y 7Btss. Todos presentaban argilanes, eran duros en seco y arcillosos. Los horizontes 3Btss y 7Btss presentaron condiciones redoximórficas y espejos de falla. El espesor de los horizontes fue de 1,25 m, 3,42 m, 1,57 m y 1,08 m, respectivamente. Solo los dos primeros eran consecutivos, los otros dos estaban separados por capas líticas.

Perfil 28-3. Su espesor fue de 19,00 m y en él se definieron dos paleosuelos Bt, el del techo con dos horizontes (4Bt-4Btss) y el de la base con un horizonte (5Bt). Todos presentaban argilanes, eran duros en seco y tenían textura limosa, arcillosa y limo-arcillosa, respectivamente. El 4Btss presentó una estructura con tendencia a bloques angulares fuertes y espejos de falla. El espesor de los paleosuelos fue de 2,50 m, 1,50 m y 5,00 m, en su orden. Los tres horizontes

eran continuos, pero entre los dos primeros y el tercero había marcadas diferencias en textura, estructura y color. Tanto en el techo como en la base se encontraron capas líticas.

Perfil 28-4. Su espesor fue de 26,00 m. En él se encontraron tres paleosuelos, los cuales se nombraron de techo a base como 3Bt, 5Bt y 7Btss. Todos presentaban argilanes, eran muy duros en seco y tenían una textura limo-arcillosa y arcillosa. Los dos primeros presentaron tendencia a una estructura en bloques angulares en tanto que en el tercero era evidente la estructura, así como los espejos de falla. Su espesor fue de 4,00 m, 4,50 m y 1,50 m, respectivamente. Todos estaban separados entre sí por capas líticas.

Perfil 30-1. Su espesor fue de 15,00 m. En él se observaron cuatro paleosuelos que de techo a base se nombraron como 4Bt, 6Bt, 8Bt y 10Btss. Todos presentaban argilanes,

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas* y contenido mineralógico** del paleosuelo en la sección tipo de las capas ferruginosas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia

Propiedades fisicoquímicas																		
Horizonte	%				pH	meq/100 gr de suelo					%			mg/kg suelo				
	A	L	Ar	MO		Ca	Mg	K	Na	CICE	SB	PSI	P	S	Fe	Cu	B	
3Btn	32	26	42	0,00	8,6	30,80	4,90	0,49	6,60	42,80	91,90	15,40	166,02	5,03	2,00	2,04	0,71	
3Btknss ₁	18	24	58	0,03	8,7	33,01	5,10	0,55	7,32	46,01	70,50	15,91	167,01	12,00	4,02	2,00	0,72	
3Btknss ₂	26	36	38	0,01	8,5	36,40	5,51	0,54	8,33	50,80	65,41	16,40	137,00	18,01	3,02	2,01	0,81	

Contenido mineralógico (%)									
	Minerales de arcilla					Otros minerales			
	Illita/mica	I/S	Esmectita	Caolinita	Cuarzo	Fp	Pl	Anatasa	Hematita
3Btn	45,96	3	5,11	48,93	38,36	3	2	3	2
3Btknss ₁	33,86	2	3,76	62,38	43,77	5	3	2	3
3Btknss ₂	52,05	2	5,78	42,16	36,15	4	4	1	2

* A, L, Ar: contenidos de arena, limo y arcilla, respectivamente. MO: contenido de materia orgánica. CICE: CIC efectiva. CIC: capacidad de intercambio catiónico. SB: saturación de bases. PSI: porcentaje de sodio intercambiable. CICE = (Ca + Mg + K + Na). SB = [(Ca + Mg + K + Na) / CIC] * 100. PSI = (Na / CIC) * 100

** I/S: integrado illita-esmectita. Fp: feldespato potásico. Pl: plagioclasas

Tabla 3. Índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia

Unidad	Horizonte	%											meq/100 gr suelo		%	
		L*	Ar*	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Na/0,35	Mg/0,9	K/0,25	Ca/0,7	WIP*	L/Ar			
Capas rojas superiores	3Btnss	28	60	16,61	3,41	0,28	10,20	29,10	3,79	1,12	23,70	57,80	0,47			
	Secuencia superior	5Btn ₁	28	62	21,50	2,89	0,31	6,70	19,10	3,21	1,24	30,71	54,30	0,45		
		5Btn ₂	30	68	14,70	2,04	0,24	6,06	17,31	2,27	0,96	21,00	41,50	0,44		
		7Btn	24	72	21,10	2,66	0,31	12,80	36,60	2,96	1,24	30,10	70,91	0,33		
	Secuencia inferior	10Bt	46	36	17,03	3,75	0,21	3,98	11,40	4,17	0,84	24,31	40,71	1,28		
		12Btss	28	68	25,70	2,14	0,31	4,75	13,60	2,38	1,24	36,72	53,90	0,41		
14Bt		32	62	27,91	2,36	0,34	4,16	11,90	2,62	1,36	39,90	55,70	0,52			
Capas ferruginosas	3Btn	26	42	30,80	4,90	0,49	6,61	18,71	5,44	1,96	44,00	70,32	0,62			
	3Btknss ₁	24	58	33,01	5,10	0,55	7,32	20,90	5,67	2,20	47,10	75,90	0,41			
	3Btknss ₂	36	38	36,41	5,51	0,54	8,33	23,80	6,11	2,16	52,00	84,11	0,95			

* L, Ar: contenidos de limo y arcilla, respectivamente. WIP: índice de meteorización de Parker

eran muy duros en seco, tenían texturas limosas, limo-arcillosas y arcillosas, así como tendencia a presentar una estructura en bloques angulares medios y fuertes, mejor definida en el 10Btss, el cual presentaba, además, espejos de falla. Su espesor desde el techo fue de 0,72 m, 4,30 m, 0,50 m y 0,40 m, respectivamente, y estaban separados por capas líticas. Resultó interesante observar cómo por encima del 4Bt se encontró una capa lítica limosa con características redoximórficas y, por debajo, otra capa de limos pardo-amarillentos que se 'gradaban' discordantemente en arcillas grises.

Perfil 30-2. Registró un espesor de 8,00 m. En él sólo se encontró un paleosuelo muy duro nombrado como 2Bt, con argilanes, textura arcillosa y tendencia a presentar una estructura en bloques angulares. Su espesor fue de 5,50 m y su color, el rojo (2.5Y4/6).

Perfil 30-3. Presentó un espesor de 9,00 m y seis paleosuelos que de techo a base se nombraron como 4Bt, 6Bt, 8Bt, 10Bt, 12Bt y 14Btknss. Todos presentaban argilanes, eran extremadamente duros en seco, tenían texturas limosas y una estructura con tendencia a presentar bloques angulares, gruesos y fuertes. El 14Btss tenía espejos de falla y

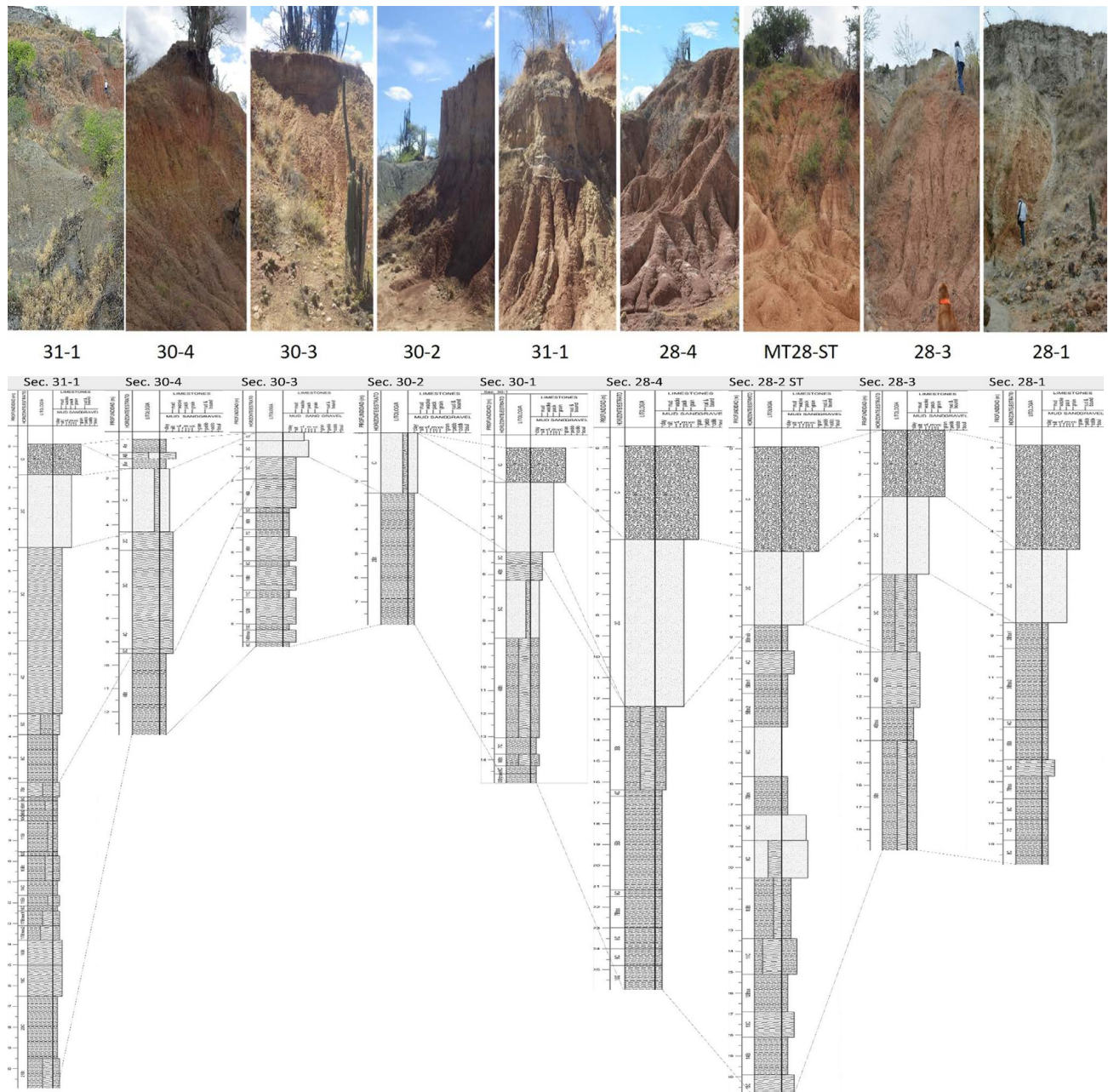


Figura 3. a. Perfiles levantados en las capas rojas inferiores del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia. **b.** Variación sincrónica de las capas rojas inferiores del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia

reaccionó de manera notable al HCl. Su espesor de techo a base fue de 1,22 m, 0,70 m, 1,00 m, 1,00 m, 1,10 m y 0,50 m, respectivamente. Todos estaban separados por capas líticas arcillosas, algunas laminadas y de colores grises y pardo oliva.

Perfil 30-4. Su espesor fue de 13,00 m. Solo en este sitio se ha preservado un suelo moderno de 1,50 m. El perfil estaba constituido por una serie de capas líticas limosas de color gris, pardo-rojizo, rosa y amarillo pálido. El único paleosuelo encontrado se nombró como 6Btss, con presencia de argilanes, extremadamente duro en seco, con textura

arcillosa y una estructura con tendencia a presentar bloques angulares; su espesor fue de 3,5 m y en él se observaron abundantes grietas abiertas. Las capas líticas superiores presentaban características redoximórficas.

Perfil 31-1. Su espesor fue de 31,00 m, y en él se encontraron ocho paleosuelos nombrados de techo a base como 7Bt, 9Bt₁-9Bt₂, 11Bt, 13Bt, 15Bt, 17Btknss₁-17Btknss₂, 18Bt y 21Bt. Todos presentaban argilanes, eran extremadamente duros en seco y tenían una tendencia a presentar una estructura en bloques angulares, fuertes, así como texturas limo-arcillosas, y estaban separados por capas

líticas arcillosas de color pardo grisáceo. En los horizontes 17Bt_{ns1}-17Bt_{ns2} la estructura presentó bloques angulares gruesos y fuertes y con espejos de falla, abundantes grietas abiertas y marcada reacción al HCl. El espesor de los horizontes de los paleosuelos desde el techo fue de 0,70 m, 0,45 m, 0,25 m, 1,50 m, 1,20 m, 0,50 m, 0,70 m, 0,70 m, 1,20 m y 1,50 m, respectivamente. Todos presentaban colores que variaban entre el rojo, el rojo-amarillento y el pardo-rojizo. El aporte detrítico de la cuenca presentó una gran monotonía, pues se trataba de un sedimento inmaduro de limos, lodolitas y arcillolitas de colores pardos, pardo rojizo, gris claro y gris oliva, con abundante cuarzo y sedimentos siliciclásticos, lo que hace que la composición mineralógica en todos los paleosuelos sea bastante similar y solo cambie la cantidad y su estado de alteración.

Variación sincrónica en las capas ferruginosas. Para este estudio se levantaron cuatro perfiles pedostratigráficos a partir de la sección tipo nombrada como MT-21ST, la cual ya se describió (Figura 4a). Esta capa presentó variaciones importantes tanto en los espesores como en las características del paleosuelo encontrado; es de resaltar que este solo se presentó en los perfiles descritos en el sector ubicado hacia el extremo sur del transecto estudiado (MT21ST, 31-2) (Figuras 4a y 4b), y estaba ausente en el resto del transecto, lo que dificultó el establecimiento de una correlación local entre los perfiles observados dentro de la capa ferruginosa.

En la parte superior de casi todos los perfiles se presentó una secuencia de una capa de arenas gruesas seguida de otra de arenas finas de color gris claro (5Y7/1), con un espesor promedio de 1,50 m y 1,30 m, respectivamente, las cuales presentaban costras muy delgadas de carbonatos. Estas capas se encontraron subyacidas por una alternancia de limos rojos y arcillas grises muy endurecidas, algunas de ellas con rasgos redoximórficos y, en algunos perfiles, hasta dos paleosuelos. Los perfiles estudiados se describen a continuación.

El perfil 1-1 tenía un espesor de 8,18 m; su techo estaba definido por una capa lítica de arena fina de color gris subyacida por capas líticas de arcillas, limos y limos arcillosos extremadamente duros sin evidencias pedogenéticas. Hacia la base se encontró una capa lítica con características redoximórficas con un espesor de 1,25 m, situada entre dos capas arcillosas, la superior de color verde manzana y la inferior de color lila.

El perfil 31-2 presentó un espesor de 43,09 m. En él se delimitaron dos paleosuelos que se nombraron de techo a base como 6Bt_{ss} y 8Bt. Ambos presentaban argilanes, eran extremadamente duros, con textura arcillosa y tendencia a presentar una estructura en bloques angulares gruesos y fuertes, de los cuales el superior presentaba espejos de falla. El espesor de los paleosuelos fue de 1,10 m y 1,30 m, respectivamente, y estaban separados por capas líticas de limolitas rojas y arcillolitas grises. Entre estos dos paleosuelos se observó una capa de 1,80 m de espesor con características redoximórficas y, por debajo de ella,

una capa lila de 0,80 m. Ambas capas se presentaban en toda esta unidad, pero, a nivel local, en algunos perfiles los colores eran más fuertes o más tenues y sus espesores variaban notablemente.

El perfil 1-2 tenía un espesor de 10,21 m. Su techo estaba definido por una capa lítica de arena media a gruesa, de color gris, subyacida por capas líticas arcillosas, las cuales variaban en color y espesor desde el gris verdoso, el pardo amarillento, el amarillo, el pardo rojizo oscuro, el naranja y, hacia la base, el gris. Hacia la parte media se observó una capa con características redoximórficas de 0,96 m, seguida hacia abajo por una capa lila.

Discusión

Pedostratigrafía de los paleosuelos en la capa ferruginosa. Por tratarse de sedimentos, las capas de este depósito pueden considerarse como un continuo geo-genético y la similitud morfológica, fisicoquímica y mineralógica entre los horizontes del paleosuelo (Tabla 1) hace pensar en un solo suelo con tres horizontes. No se observaron diferencias marcadas que puedan sugerir diferentes pedogénesis en cada horizonte. Las diferencias anotadas para el segundo horizonte (3Bt_{knss1}) pueden estar relacionadas con un mayor tiempo de exposición de este a las condiciones ambientales. Si se considera un solo paleosuelo con tres horizontes, su clasificación correspondería a la de *sodic haplotorrerts* por los muy bajos contenidos de materia orgánica y los altos contenidos de bases (ambiente más seco que ústico).

Los tres horizontes de la secuencia 3Bt_n-3Bt_{knss1}-3Bt_{knss2} tuvieron un mismo material parental, de origen sedimentario, rico en micas y feldespatos, que produjo arcilla esmectítica por meteorización y pedogénesis, característica de un clima cálido y seco muy contrastante en humedad.

Índices pedológicos de los paleosuelos de las capas rojas. Los mayores valores de WIP se dieron en el paleosuelo de la capa ferruginosa, cuyos suelos registraron el menor grado de evolución, lo que evidenciaría que la exposición al ambiente entre los tiempos de depositación de las capas de sedimentos que los originaron fue muy breve y no permitió una meteorización intensa de los sedimentos y, asimismo, que el ambiente durante su sedimentación fue demasiado seco (régimen de humedad tórrico), lo cual habría inhibido su alteración.

La variación de la meteorización en los tres primeros horizontes de la secuencia superior fue normal y se observó una inconsistencia en su grado de meteorización con respecto al del horizonte 7Bt_n, menos meteorizado, lo que podría implicar que entre el 5Bt_n y el 7Bt_n hubo una discordancia erosiva o que el 7Bt_n fue sepultado rápidamente, lo que impidió su evolución pedológica. En los paleosuelos de la secuencia inferior, así como en los de la capa ferruginosa, se observó que el grado de meteorización era inverso al orden observado en la secuencia superior, lo que podría indicar que los tiempos de exposición de los suelos al ambiente fueron menores en los horizontes más profundos.

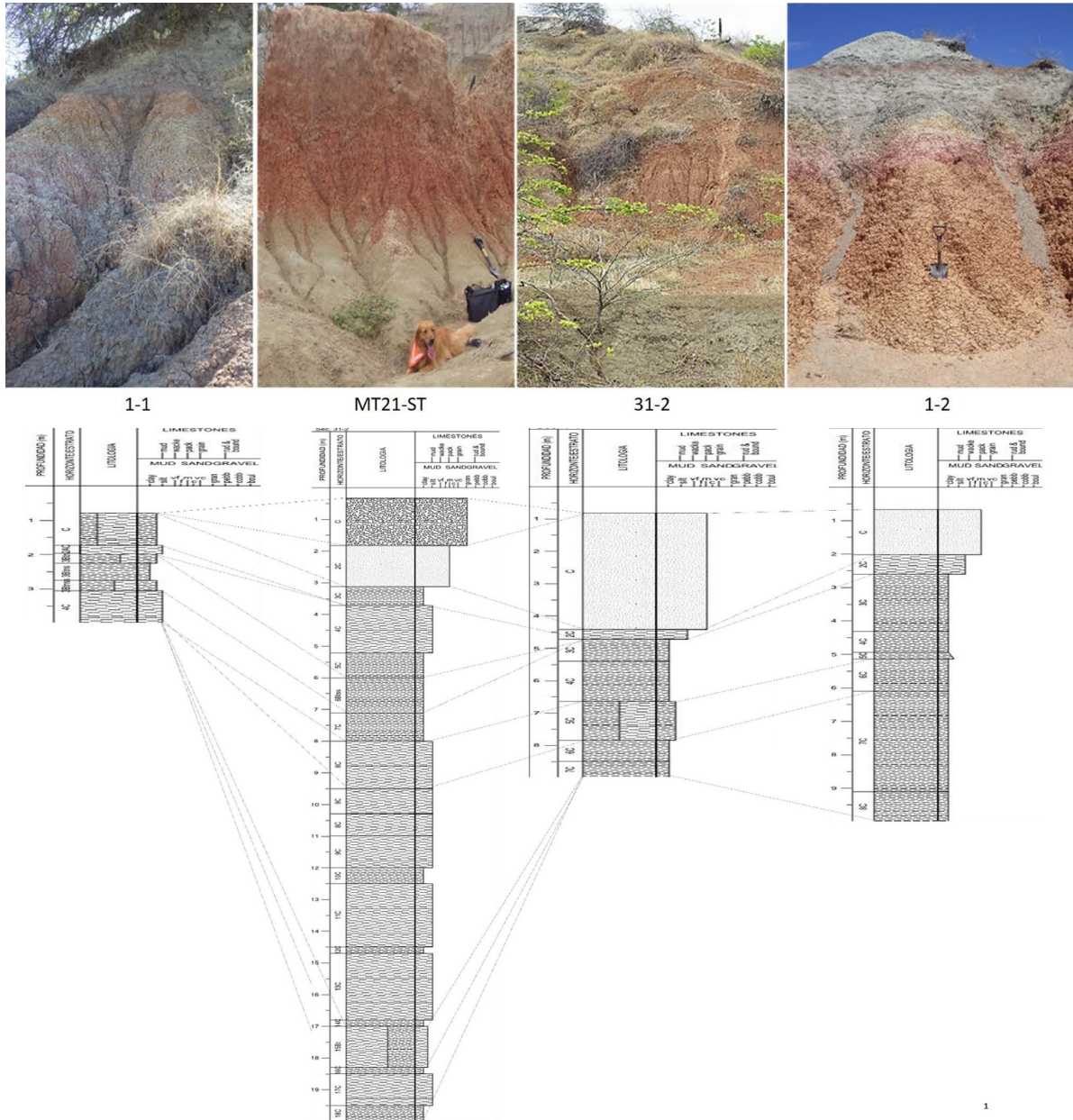


Figura 4. a. Perfiles levantados en la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia. **b.** Variación sincrónica de la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa, Huila Colombia

Con base en las observaciones realizadas en campo y en los resultados obtenidos en laboratorio pueden plantearse las siguientes conclusiones.

1. Todos los paleosuelos se desarrollaron de materiales parentales arcillosos o, por lo menos, de materiales que produjeron grandes cantidades de arcilla por meteorización y pedogénesis.
2. El clima dominante en la evolución de estos suelos correspondió a uno seco y muy contrastado en humedad: épocas lluviosas muy húmedas y las menos lluviosas muy secas, ya que presentaban argilanes, conservaban un alto contenido de bases y uno muy bajo de materia orgánica.
3. Todos los paleosuelos estaban separados entre sí por capas de arena o de limo, lo que implica alteraciones en el comportamiento hídrico en la cuenca y, por ende, en la dinámica sedimentaria en el sitio. Estas alteraciones pudieron originarse por cambios climáticos regionales o por cambios en el nivel de base de la cuenca, y también podrían ser responsables, por lo menos en parte, de la intensa erosión que siempre se ha dado en la zona.
4. Todos los paleosuelos presentaban horizontes argílicos (Bt), cuya formación requiere contrastes de humedad, estabilidad geomorfológica y condiciones de dispersión

- de coloides que permitan su movilización y precipitación dentro del suelo (Pulido, et al., 1990; Malagón, et al., 1995; Buol, et al., 1997; SSS, 1999).
5. La abundancia de horizontes argílicos y su espesor, así como el espesor que se consigue sumando todos los horizontes argílicos descritos (20,36 m), implica que se necesitaron varios milenios (más de 20, teniendo en cuenta los cálculos y presunciones de Alexandrovskiy, 2007) para la formación de las secuencias analizadas. A ello debe añadirse la parte de los suelos y de otros materiales que se perdieron por erosión y que no pueden cuantificarse hoy.
 6. En todos los paleosuelos se presentó una fuerte erosión que los decapitó a todos, eliminando los horizontes A y, muy probablemente, parte de otros horizontes subsuperficiales, la cual se garantiza por efecto de un clima seco con épocas lluviosas muy húmedas y torrenciales.
 7. La abundante cantidad de cuarzo, la escasez de feldspatos y otros minerales meteorizables y la abundancia en esmectitas y caolinita indican una meteorización intensa del material parental producto de un ambiente netamente oxidante, típico de los climas estacionales contrastantes en humedad que se han mencionado antes.
 8. Los procesos pedogenéticos dominantes en la formación de los paleosuelos han sido la mineralización de la materia orgánica, la rubefacción, la braunificación o la pardificación generalizada en el suelo por acumulación de hierro oxidado, con o sin materia orgánica, la argiluvación y la lixiviación de arcilla, la fersialitización, que conlleva la formación de las esmectitas, la alcalinización, la carbonatación, el adensamiento, la vertisolización o argiloturbación y la erosión hídrica. Esta línea evolutiva ha evitado la lixiviación de bases y ha generado suelos decapitados, poco meteorizados, con limitadas propiedades físicas y calco-sódicas. El color rojo de los paleosuelos se debe a la intensa oxidación del hierro liberado por meteorización y a la rápida mineralización de la materia orgánica. Esta pedogénesis es característica de un ambiente cálido, seco y muy contrastado en humedad.
 9. Los valores de los índices L/Ar confirman un mediano grado de evolución en los paleosuelos evaluados. A pesar de esto, se pudo establecer que en ellos se han dado procesos de alteración mineralógica, con destrucción de micas y feldspatos que ha producido, por una parte, modificaciones en la mineralogía detrítica y, por otra, neoformación de especies arcillosas.
 10. En las granulometrías más finas se impregnó todo el plasma con compuestos de hierro cuya fuente es, muy posiblemente, la desestabilización de las biotitas y de las cloritas que no han desaparecido por completo en la actualidad.
 11. Durante el periodo de menor drenaje se produjo la formación de esmectitas, probablemente a partir de la alteración de piroxenos y olivinos (Craig & Loughnan,

1964; Loughnan, 1969). Posteriormente, con el aumento del drenaje, el suelo perdió los cationes básicos solubles y aumentó la actividad del aluminio, lo que provocó una progresiva aluminización de los minerales esmectíticos y la formación de caolinita mediante el interestratificado de illita y esmectita. La depositación de arenas intercaladas con limolitas protegió el suelo original de los agentes de alteración y explica que se mantenga todavía en la actualidad el interestratificado de illita y esmectita.

Variación sincrónica de las capas rojas del desierto de La Tatacoa. *Variación sincrónica de las capas rojas inferiores.* Las descripciones anteriores permiten señalar que las capas rojas inferiores presentan variaciones importantes en todo el transecto de su expresión en el desierto, tanto en los espesores como en las características de sus capas líticas y de los paleosuelos (Figura 3b). Solo en el perfil 30-4 se observó un suelo moderno bien definido con un *solum* formado por los horizontes A-AB-Bw, bien estructurados y con un espesor de 0,55 m, 0,28 m y 0,42 m, respectivamente. Subyacente a este suelo se encuentra una capa lítica de arenas finas y medias de color pardo amarillento (10YR5/6).

En casi todos los perfiles se presentó, en la parte superior, una secuencia de dos capas líticas conformadas por conglomerados de matriz soportados, heterométricos y heterogéneos, con una matriz arenosa gruesa de color gris claro (5Y7/1) y un espesor promedio de 2,98 m subyacente por una capa arenosa media que varió entre un color pardo amarillento y uno gris claro, con un espesor promedio de 2,88 m.

Las dos capas superiores mencionadas pueden coincidir con lo que Henao (1950) denominó “*intermediate clays and sandstone*”, constituidas por areniscas grises y arcillolitas arenosas de coloraciones grises, de 38,00 m de espesor, ubicadas estratigráficamente entre las capas rojas superiores e inferiores. Por debajo de estas dos capas líticas se encuentran otras que pueden variar entre limos, limos arenosos, limos arcillosos y arcillolitas de colores pardo, pardo rojizo, gris claro y gris verdoso de diversos espesores, las cuales alternan con los paleosuelos.

Las diferencias en los espesores y la ubicación, tanto de los paleosuelos como de las capas líticas, sugieren diferencias locales importantes en la dinámica fluvial de la cuenca que aportó los sedimentos para conformar estas unidades estratigráficas. En el perfil 30-3, por ejemplo, fue notoria la cantidad de horizontes Bt (seis) intercalados y separados por capas delgadas de sedimentos, lo que podría relacionarse con su localización fisiográfica vecina a la quebrada La Venta que podría haberlo afectado con suaves desbordamientos periódicos que no alcanzaron a tener impacto en otros sitios muestreados.

Contrastan con lo anterior los grandes espesores de materiales líticos que se encontraron sobre los paleosuelos de los perfiles 28-1, 28-3, 28-2 ST, 28-4, 30-4 y 31-1, más aislados de la influencia fluvial y, por lo tanto, limitados en su pedogénesis. En la gráfica de correlación de la Figura 3b

se configura, asimismo, la presencia de paleorrelieves que pudieron haber incidido en el desarrollo de los paleosuelos debido a su carácter denudativo, lo que se confirma con las variaciones en los espesores de los horizontes descritos.

La mayoría de los horizontes que presentaban espejos de falla u horizontes nátricos se presentaron en la secuencia inferior de paleosuelos. Cuando aparecieron en los paleosuelos de la secuencia superior, se presentaron en los perfiles localizados hacia el sector más occidental del transecto. El contenido y el tipo de arcilla de estos horizontes se diferenciaron del resto de los horizontes iluviales descritos y su presencia puede indicar cambios puntuales en la dinámica fluvial de la cuenca, que aportó sedimentos más finos o registró cambios en el régimen de humedad de los suelos hacia condiciones más secas.

Variación sincrónica en las capas ferruginosas. En los perfiles levantados y en las observaciones de esta unidad realizadas en campo, se detectaron en los horizontes de los paleosuelos evidencias pedogenéticas como el color, la presencia de argilanes, la estructura y los espejos de falla. En todos los casos estos paleosuelos alternaron con capas líticas. En todos los perfiles se encontraron condiciones redoximórficas en las capas líticas limosas o limo-arcillosas encontradas encima de los paleosuelos o subyacentes a ellos.

Las descripciones hechas en los dos conjuntos de capas rojas estudiados permiten establecer que en ambos hubo diferencias en los espesores y en la ubicación tanto de los paleosuelos como de las capas líticas, lo que sugiere diferencias locales importantes en la dinámica fluvial de la cuenca que aportó los sedimentos para conformar estas unidades estratigráficas.

Asimismo, en los paleosuelos diferenciados en todos los perfiles levantados hubo variación espacial en el color, el espesor y la textura. Además, en todos hubo evidencias de pedogénesis, como la presencia de argilanes y el desarrollo de la estructura, que son rasgos dominantes, en tanto que la presencia de espejos de falla y la expresión de condiciones redoximórficas lo son menos.

En todos los paleosuelos se presentaron horizontes de iluviación de arcilla (Bt), aunque con amplias variaciones en su espesor y en su localización dentro del perfil. Estos procesos de iluviación de arcilla requieren de un clima de periodos secos con grandes déficits de humedad seguidos por periodos con alta pluviosidad.

La presencia de horizontes argílicos en todo el espesor de todos los conjuntos de capas rojas indica que a lo largo de toda su formación el clima dominante en la región fue el cálido seco con contrastes de humedad estacionales importantes.

El carácter alcalino de todos los suelos también corrobora que se formaron bajo la influencia de un clima relativamente seco que no aportó suficiente humedad para lixiviar las bases que se iban liberando por la meteorización.

Las condiciones climáticas netamente oxidantes que genera el clima seco estacionalmente contrastado en humedad también explican, en buena parte, el enrojecimiento

generalizado de las capas rojas formadas por la oxidación del hierro liberado, por la meteorización o la pedogénesis de los minerales.

La presencia de los paleosuelos intercalados con capas líticas de granulometría variable y sin pedogénesis indica que en la región se presentó una inestabilidad importante en las condiciones climáticas y geomorfológicas durante la época en que se formaron los conjuntos de capas rojas en el desierto, alternando épocas de periodos estables suficientemente largos como para permitir la formación de suelos iluviales y otros periodos cortos de condiciones climáticas más torrenciales que no dieron tiempo a la formación de un suelo.

Análisis macromorfológico y micromorfológico de los paleosuelos de las capas rojas. A manera de complemento, se presentan en esta sección las evidencias macromorfológicas y micromorfológicas que confirman la presencia de paleosuelos en las secuencias estratigráficas de las capas rojas inferiores y la capa ferruginosa del desierto de La Tatacoa.

Evidencias pedogenéticas macroscópicas. En los paleosuelos de las dos capas estudiadas se encontró el desarrollo de color, estructura, cutanes y espejos de falla en los suelos, así como la movilización de arcilla, óxidos de hierro, manganeso y carbonatos de calcio, lo cual evidenció procesos pedogenéticos como la iluviación, la lixiviación, la carbonatación y la fersialitización. Los pH alcalinos observados indican procesos de solodización y las arcillas expansibles produjeron una intensa vertisolización.

Como características dominantes se encontraron la coloración roja con los matices 5YR y 7,5YR y valores y crominancias menores de 6, las texturas arcillosas, el desarrollo estructural, la reacción alcalina y la presencia de argilanes, espejos de falla y horizontes nátricos o cálcicos.

A nivel de campo se encontraron evidencias de pedogénesis, como el desarrollo de la estructura de suelos, aunque no muy avanzado dadas las condiciones climáticas secas en que han evolucionado (Figuras 5a, 5b).

El color rojo de los suelos puede haberse generado mediante procesos simultáneos de meteorización y pedogénesis. La meteorización alteró los minerales primarios de los sedimentos del material parental, lo que liberó hierro de ellos, el cual pasó a la matriz y fue redistribuido en ella por translocación pedogenética. En una etapa posterior el hierro se oxidó generando el color característico que inicialmente se presenta en forma de masas como las que se observan en las Figuras 5c y 5e y que, finalmente, le imprimen el color rojo homogéneo a todo el suelo, como se aprecia en las Figuras 5a, 5b, 5j y 5l. Los procesos de liberación por meteorización, y la posterior transformación, translocación, depositación y acumulación en la matriz del suelo, como los descritos antes para el hierro, también se produjeron con el manganeso y el calcio, como puede verse en las Figuras 5d, 5f, 5g y 5k.

En una pedogénesis más avanzada se generaron procesos de iluviación y lixiviación que dieron origen a los argilanes (Figuras 5e y 5j), a los manganes (Figuras 5f y

5k), y a los recubrimientos calcáreos (Figuras 5d y 5g). En algún momento de la historia genética de estos paleosuelos estos debieron estar bajo condiciones redoximórficas, las cuales generaron los colores variegados que se presentan en los suelos de las Figuras 5c y 5e, así como la formación de nódulos (Figura 5h) y de concreciones (Figura 5i).

Debido al carácter expansivo de las arcillas predominantes en estos suelos, se dio un proceso intenso de vertisolización que se manifiesta en una gran cantidad de espejos de falla bien desarrollados (Figuras 5d, 5j y 5k), además de una estructura cuneiforme típica como la que se observa en la Figura 5l. Nótese que, en ocasiones, los

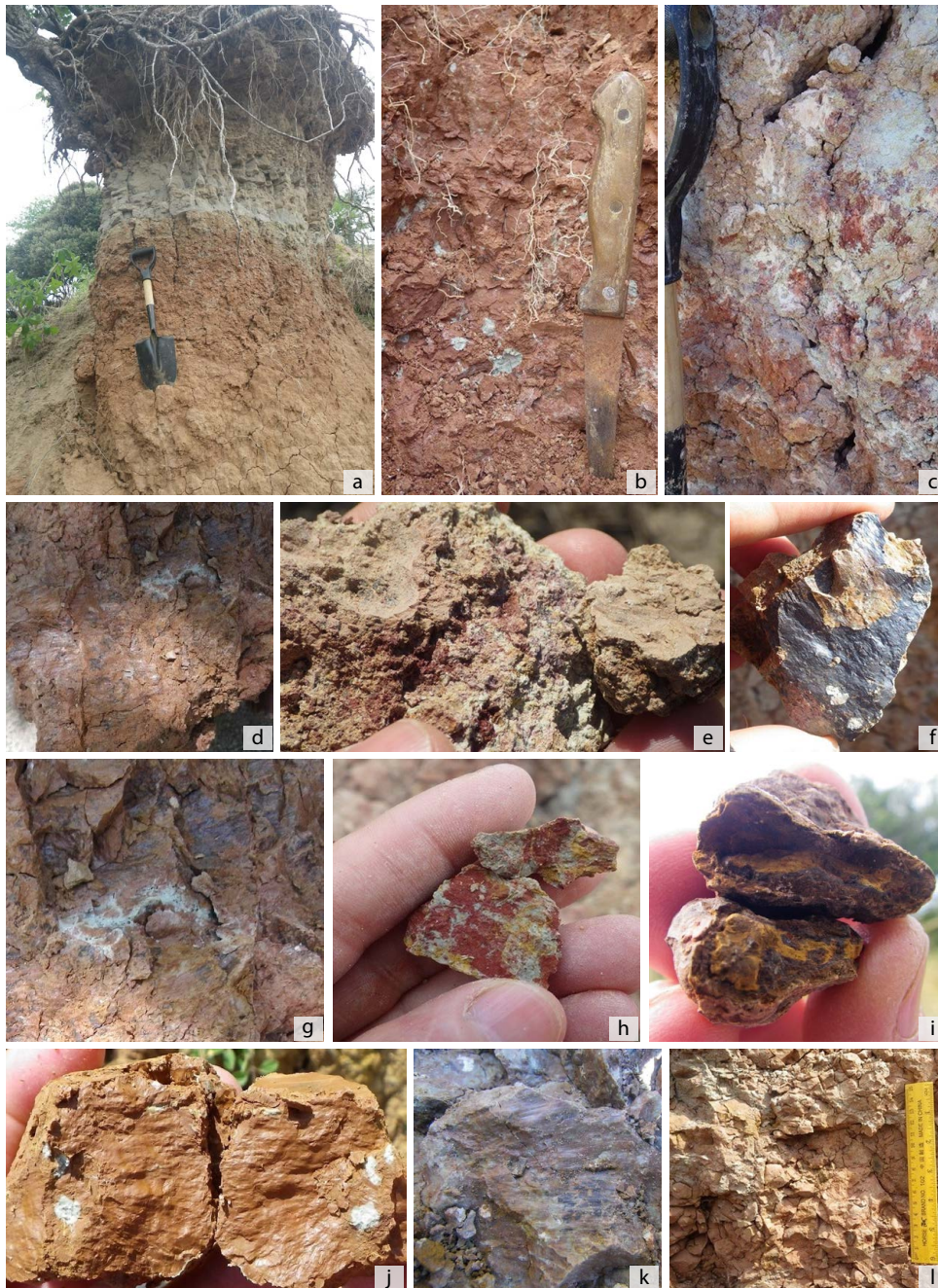


Figura 5. Rasgos pedológicos macromorfológicos en paleosuelos del desierto de La Tatacoa, Huila, Colombia. **a.** Desarrollo de estructura en bloques angulares, gruesos, moderados. **b.** Horizonte oscuro, estructura en bloques, presencia de raíces y nódulos arcillosos. **c.** Masas de hierro en la matriz. **d.** Movilización y depositación de compuestos de hierro (rojos), manganeso (negros) y calcio (blancos). **e.** Argilanes. **f.** Manganeso. **g.** Recubrimientos con carbonato de calcio. **h.** Nódulo de arcillas y óxidos de hierro. **i.** Concreciones de hierro y manganeso. **j. - k.** Espejos de falla pedológicos sobre argilanes, manganeso y nódulos calcáreos. **l.** Desarrollo de estructura cuneiforme en paleosuelos del desierto de La Tatacoa.

espejos de falla (Figuras 5d y 5k) se han desarrollado sobre superficies que ya tenían cutanes de diferentes composiciones (arcillas, óxidos de hierro o manganeso). En algunos sitios las condiciones fuertemente alcalinas han llevado a los suelos a desarrollar estructuras con tendencia columnar (Figura 5c).

Es notable la acción de los procesos generadores de pérdidas netas en el suelo, como la mineralización de la materia orgánica y la erosión hídrica, los cuales no han permitido el desarrollo o la conservación de horizontes A en los paleosuelos encontrados.

Evidencias pedogenéticas microscópicas. Se pudieron detectar procesos de difusión de óxidos de hierro o manganeso en la matriz del suelo que le imprimieron el color rojo o negro característico. Además, se detectaron movilizaciones y acumulaciones de arcilla y de óxidos de hierro y manganeso en poros, así como la formación de microagregados en bloques angulares.

En el examen micromorfológico de los paleosuelos de las capas rojas inferiores y de la capa ferruginosa se pudieron visualizar minerales como el cuarzo, los feldspatos, las plagioclasas, los piroxenos y los anfíboles, algunos de procedencia volcánica, así como micas, circones, esfenas y minerales de neoformación como caolinitas, la mayoría de ellos altamente meteorizados. Además, son evidentes los óxidos de hierro y manganeso de forma irregular, tales como las concreciones, las masas, los opacos y los coágulos, así como componentes de origen orgánico: polen, esporas, restos de tejido vegetal, silicofósiles, tecamebas y diatomeas, estas dos últimas indicativas de que en algún momento el suelo estuvo inundado. En las secciones delgadas de los paleosuelos de la Figura 6 se pueden observar los siguientes rasgos sobresalientes.

1. La impregnación de todos los materiales con óxidos de hierro, lo que determina la coloración rojiza de los suelos (Figura 6a), así como la segregación de óxidos de manganeso cerca de los poros que forma recubrimientos muy oscuros en sus paredes y en el material edáfico aledaño (Figura 6b).
2. Aunque en las secciones delgadas no se puede definir claramente la iluviación de arcilla, sí es evidente la movilización y la acumulación de este material en los poros de los suelos (Figura 6c). Por la forma en que se presentan estas acumulaciones puede pensarse en un movimiento masivo de la arcilla suspendida en agua que entró de forma casi torrencial a los poros, pero cuyo flujo se suspendió intempestivamente sin dar tiempo a la orientación de las láminas de la arcilla a lo largo de la pared del poro (Figura 6d).
3. En la mayoría de los suelos analizados es notable el poco desarrollo estructural que presentaban: había poca porosidad y ésta era básicamente planar-tabular. Sin embargo, en varios suelos se apreció la formación de microagregados, preferencialmente en forma de bloques angulares (Figura 6d).

4. Se observaron concreciones de hierro y manganeso y se evidenció la movilización y la acumulación de óxidos de hierro y manganeso a la manera de cutanes rellenando los poros o como concreciones en los paleosuelos (Figura 6e).
5. Aunque limitado, se evidenció un desarrollo estructural con algunos microagregados angulares (Figura 6f).
6. Se encontraron pocos componentes orgánicos en los paleosuelos, pero fue posible observar algunos, aunque su identificación fue difícil por las formas que presentaban; además, se encontraron semillas, tecamebas, polen y algunos fragmentos vegetales (Figura 6g).
7. En cuanto a los minerales, en algunos suelos fue posible diferenciar sus agregados formando un mosaico marcadamente pleocroico, o como minerales individuales bien conservados y sin rastros de meteorización, tales como circones, piroxenos o anfíboles (Figura 6f). También se detectaron líticos que hacen parte del material parental, como algunos granos de areniscas medias y gruesas. Las arcillas se caracterizaron física y químicamente mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) como montmorillonita, caolinitas, esmectitas e illitas (Figura 6j).

Conclusiones

Se confirmó la presencia de paleosuelos en las secuencias estratigráficas de las capas rojas inferiores y de las capas ferruginosas del desierto de La Tatacoa, en el Huila, Colombia. Macromorfológicamente y micromorfológicamente se observaron rasgos pedológicos como cutanes, espejos de falla, translocación de óxidos de hierro y manganeso y de carbonatos de calcio. Se observó la formación de estructuras de suelo y la generación de color a partir de procesos de transformación de minerales primarios y de translocación de sus productos a través de la matriz del suelo.

Se presentó una alta variabilidad espacial en las capas rojas del desierto estudiadas a lo largo de los transectos en los que se hicieron observaciones locales de perfiles tanto en el contenido, el espesor y la ubicación de los paleosuelos como de las capas líticas con las que estaban intercalados.

En la evolución de los paleosuelos se presentó un fuerte control climático (seco y estacional contrastado en humedad) y litológico (material parental sedimentario con minerales portadores de bases y de hierro). Estos controles generaron procesos pedogenéticos de iluviación, lixiviación, mineralización de la materia orgánica, solodización, rubefacción, fersialitización, carbonatación, adensamiento y erosión hídrica.

La intercalación de los paleosuelos con capas líticas de granulometría variable, sin pedogénesis, evidencia que en la región se presentó una inestabilidad importante en las condiciones climáticas y geomorfológicas durante la época en que se formaron los conjuntos de capas rojas en el desierto.

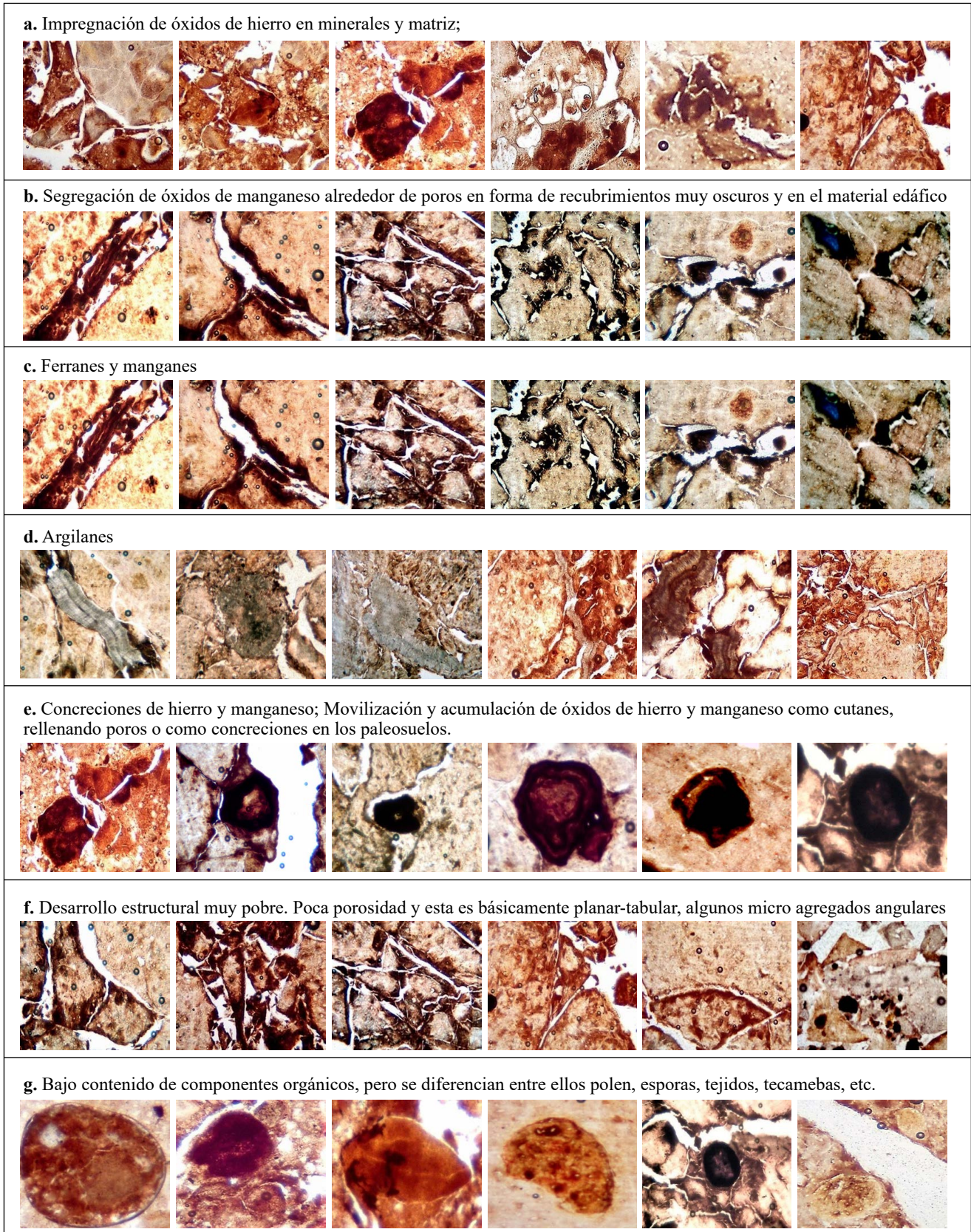


Figura 6. (Leyenda de la figura en la siguiente página)

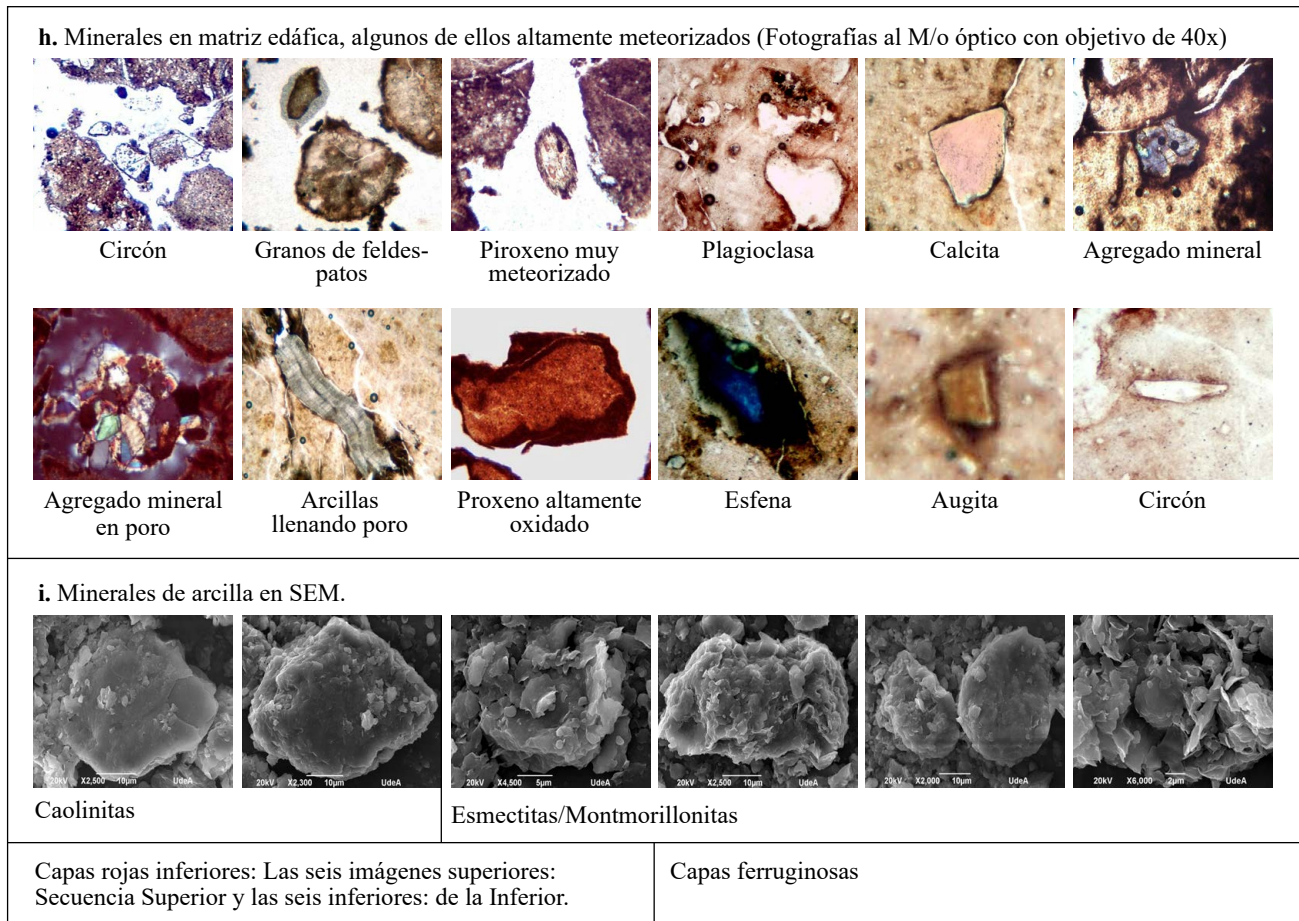


Figura 6. a. Impregnación de óxidos de hierro en minerales y matriz. **b.** Segregación de óxidos de manganeso alrededor de poros en forma de recubrimientos muy oscuros y en el material edáfico. **c.** Ferranes y manganesos. **d.** Argilanes. **e.** Concreciones de hierro y manganeso; movilización y acumulación de óxidos de hierro y manganeso en forma de cutanes que rellenan poros, o como concreciones en los paleosuelos. **f.** Desarrollo estructural muy limitado, poca porosidad, básicamente planar-tabular, y algunos microagregados angulares. **g.** Bajo contenido de componentes orgánicos, aunque se detectaron entre ellos polen, esporas, tejidos, tecamebas, etc. **h.** Minerales en matriz edáfica, algunos de ellos altamente meteorizados (fotografías: microscopio óptico, 40x). **i.** Minerales de arcilla visualizados con microscopía electrónica de barrido (MEB).

Como mecanismo responsable del color dominante en las capas rojas del desierto de La Tatacoa, se propone la liberación de hierro de los minerales primarios por meteorización o pedogénesis, su difusión dentro de la matriz del suelo y su posterior oxidación.

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, en especial del Señor Decano, Arley Zapata, por el apoyo logístico; al Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, GAIA, de la Universidad de Antioquia; al laboratorio GMAS⁽⁺⁾ y al Sr. Jorge Arcila por su valioso acompañamiento durante el trabajo de campo.

Contribución de los autores

La base geológica y litoestratigráfica la realizó Luis Norberto Parra, el levantamiento de los suelos y paleosuelos y sus descripciones estuvo a cargo de María Teresa Flórez

y Daniel Francisco Jaramillo. Los análisis de difracción de arcillas los realizó José María Jaramillo, la mineralogía de granos y en SEM la trabajaron María Teresa Flórez y Luis Norberto Parra, finalmente, la micro morfología en su conjunto la describió María Teresa Flórez. El análisis final de los resultados obtenidos de los levantamientos de campo, físico químicos, mineralógicos, micro morfológicos y de difracción de rayos X, fue discutida por todo el equipo de trabajo.

Conflicto de intereses

El artículo no tiene conflicto de intereses en su totalidad en autoría propia de los autores.

Referencias

Alexandrovskiy, A.L. 2007. Rates of soil-forming processes in three main models of pedogenesis. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 24 (2): 283-292.

- Buol, S.W.** (2010). Evolution of the text Soil Genesis and Classification. *Soil Survey Horizons*. **51**: 116-117.
- Craigh, D.C. & Loughnan, F.C.** (1964). Chemical and mineralogical transformations accompanying the weathering of basic volcanic rocks from New South Wales. *Aust. J. Soil Res.* **2**: 218-234.
- Fields, R.W. & Henao, L.D.** (1949). Honda formation of the upper Magdalena river basin, Colombia, S.A. [abs.]: Geological Society of America Bulletin. **60**: 1894.
- Fields, R.W.** (1959). Geology of the La Venta Badlands Colombia, South America. *U. California, Publ. Geol. Scienc.* **32** (6): 405-444.
- Flórez M. T.** (2000). Génesis de paleosuelos ándicos a partir del estudio de pedocomponentes. Universidad Nacional, Facultad de Ciencias, Tesis de Maestría, Medellín. p. 260.
- Flórez, M.T., Parra, L.N., Jaramillo, D.F., Jaramillo, J.M.** (2013). Paleosuelos del mioceno en el desierto de la Tatacoa. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **37** (143): 229-244.
- González, L. H., Parra, L. N., Flórez, M. T.** (1993). Andisoles fósiles en el Norte de Colombia. *Suelos Ecuatoriales*. **23** (1-2): 31-44.
- Guerrero J.** (1994). Stratigraphy, sedimentary environments, and the Miocene Uplift of the Colombian Andes. En: R.F. Kay, R.H. Madden, R.L. Cifelli, J.J. Flynn (editores). *Vertebrate paleontology in the Neotropics: The vertebrate fauna of La Venta, Colombia*. Smithsonian Institution Press. Washington D.C., USA. p. 15-43.
- Henao, D.** (1950). Geology of La Venta District: The fossiliferous area of the Upper Magdalena Valley. Informe No. 718, Ministerio de Minas y Petróleos, Sección 5a, Servicio Geológico Nacional, Bogotá, Colombia. 49 p, + 6 mapas, + 2 columnas estratigráficas. Informe técnico, 13 de septiembre, 1950.
- Herd, D. G.** (1982). Glacial and volcanic geology of the Ruiz, Tolima volcanic complex, Cordillera Central. Colombia: *Publicaciones Geológicas Especiales de Ingeominas*, No. 8. p. 48.
- Kraus M. J.** (1999). Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geo-logic applications. *Earth Science Reviews*. **47** 1999: 41-70.
- Loughnan, F.C.** (1969). Chemical weathering of the silicate minerals. *American Elsevier Publ. Co. New York*, p. 27-66.
- Malagón, D., Pulido, C., Llinás, R., Chamorro, C.** (1995). Suelos de Colombia: origen, evolución, clasificación, distribución y uso. IGAC. Bogotá. 632 p.
- Malucelli, F., Terribile, F., Colombo, C.** (1999). Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of Andosols on the Island of São Miguel (Azores). *Geoderma*. **88**: 73-98.
- Mantilla G., De La Torre S., Gómez C., Ordóñez N., Ceballos J., Euscátegui C., Pérez P., Martínez N., Sánchez R., Maldonado N., Pérez S., Gaitán J., Chamorro C. & Flórez A.** (2011). Los suelos: estabilidad, producción y degradación. Consultado en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005192/medioambiente/cap6.pdf>
- Morrison R.** (1978). Quaternary Soil Stratigraphy. Concepts, Methods, and Problems. En: *Quaternary soil. Third York Quaternary Symposium*. Geo Abstracts, Norwich, England.
- Nettleton, W.D., Olson, C.G., Wysocki, D.A.** (2000). Paleosols classification: Problems and solutions. *Catena*. **41**: 61-92.
- Parra, L.N.** (2016). Litoestratigrafía del Neógeno de La Tatacoa, Huila, Colombia. Informe de Año Sabático, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Inédito. 41 p.
- Parker, A.** (1970). An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*. **107**: 501-504.
- Pulido, C., Malagón, D., Llinás, R.** (1990). Paleosuelos del piso alto andino en la región montañosa circundante a Bogotá. *Investigaciones*. V. 2, N° 2. Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Bogotá. 198 p.
- Retallack, G. J.** (1998). Core concepts of paleopedology. *Quaternary International*. **51-52**: 203-212.
- Retallack, G. J.** (2001). *Soils of the Past. An introduction to paleopedology*, Second edition. Blackwell, USA, 391 pp.
- Sánchez, C., Salazar, J., Bonilla A.** (2017). Estudio de las unidades pedogenéticas del Mioceno Medio en el desierto de la Tatacoa. En: *Memorias XVI Congreso colombiano de Geología*, Santa Marta, Colombia, agosto 28 - septiembre 01 de 2017, Bogotá, p. 1455-1456 pp.
- Salazar-Jaramillo, S., Ochoa, A., Cadena, A., Guerrero, J.** (2017). Geoquímica y climo-funciones aplicadas a paleosuelos del Mioceno Medio en el desierto de la Tatacoa. En: *Memorias XVI Congreso colombiano de Geología*, Santa Marta, Colombia, agosto 28 - septiembre 01 de 2017, Bogotá, p. 1455-1456.
- Salomons J.** (1989). Paleocology of volcanic soils in the Colombian Central Cordillera (Parque Nacional Natural de los Nevados. In: *Studies on tropical Andean ecosystems*. Berlin. **3**: 15-217.
- Schoeneberger, P.J. Wysocki, D.A. Benham, E.C., Broderson, W.D.** (2002). *Field book for describing and sampling soils*. Version 2.0. Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center. Lincoln, NE. USA.
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Gama-Castro, J.E., Vallejo-Gómez, E., González-Velázquez, A.** (2001). Buried paleosols of Nevado de Toluca: An alternative record of Late Quaternary environmental change in Central México: *Journal of Quaternary Science*. **16**: 375-389.
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Terhorst, B., Solé, J., Flores-Delgadillo, M.L., Werner, G., Poetsch, T.** (2009). The Tlaxcala basin paleosol sequence: A multiscale proxy of middle to late Quaternary environmental change in central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. **26**: 448-465.
- Shoji, S., Nanzyo M., Dahlgren, R.** (1993). *Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization*, Elsevier, Science Publishers, Soil Survey Staff. 1999.
- Soil Survey Staff (SSS).** (1999). *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*, Second edition. Agricultural Handbook 436, Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington DC, USA, p. 869.
- Soil Survey Staff (SSS).** (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. Eleventh Edition. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Washington, D.C. 338 p.
- Stirton, R. A.** (1953). Vertebrate paleontology and continental stratigraphy in Colombia. *Geol. Soc. Am. Bull.* **64**: 603-622.
- Thouret, J.C., A. Murcia, N. Vatin-Perignon, Salinas, R.** (1985). Cronoestratigrafía mediante dataciones K/Ar y C-14 de los volcanes compuestos del Complejo Ruiz-Tolima y aspectos volcano-estructurales del Nevado del Ruiz, p. 292-452. Ingeominas y University of Grenoble, Sexto Congreso Latinoamericano de Geología, Medellín, Colombia, octubre 1985.
- Universidad Surcolombiana (USCO).** (2005). Convenio Interadministrativo No 1071-200 de 2005, Gobernación del Huila-CAM-USCO.
- Van Wambeke.** (1991). *Soils of the Tropics: Properties and appraisal*, McGraw Hill, Inc., USA.
- Young A.** (1976). *Tropical soils and soil survey*, Cambridge University Press, Cambridge.