

CONDICIONES PALEOCLIMÁTICAS MIOCENICAS EN LAS CAPAS ROJAS Y EN LOS PALEOSUELOS DE LOS GRUPOS LA ARENOSA Y LA VENTA, TATACOA, HUILA, COLOMBIA^a

MIOCENIC PALEOCLIMATIC CONDITIONS IN THE RED LAYER AND THE PALEOSOILS OF LA ARENOSA GROUPS AND LA VENTA, TATACOA, HUILA, COLOMBIA

MARÍA TERESA FLÓREZ-MOLINA^{b*}

Recibido 16-12-2020, aceptado 16-04-2021, versión final 30-06-2021.

Artículo Investigación

RESUMEN: Del Mioceno del Valle Superior del Magdalena, Colombia, se resaltan los Grupos La Venta y La Arenosa. En La Venta (13.8-11.6 Ma, pos oscilaciones), la sedimentación la produjo ríos aluviales y fluviales que dejaron enormes depósitos arenosos, limosos y gravillosos rosados en base y techo, al interior capas líticas grises y, limos rojos, duros y meteorizados y paleosuelos. Sobresale dentro del grupo la Formación Villavieja por su riqueza fosilífera y en ella la Unidad Arenas Ferruginosas. En esta los paleosuelos (Sodic Haplotorrerts), se formaron en un clima estacionalmente muy contrastado, bajo un régimen tórrido (inviernos fríos y húmedos y veranos muy cálidos y más secos). La Arenosa es contemporánea con el Óptimo Climático del Mioceno Medio (MMCO), la Transición Climática del Mioceno Medio (MMCT) y la Anomalía Isotópica de Oxígeno (Mi-3b). Su sedimentación la produjo enormes ríos caudalosos que dejaron depósitos arenosos y limosos grises. En él se resalta La Formación La Borrega que tiene cuatro Paquetes Colorados (PC) duros y meteorizados, coetáneos con el MMCO. En los limos y arenas que los separan, cinco paleosuelos (Lithic Haplusterts), formados en un clima estacional, contrastado, bajo un régimen ústico (inviernos fríos y extremadamente húmedos). La Venta y La Arenosa, tienen capas rojas altamente meteorizadas enriquecidas en carbonatos, sales, Fe y Al, sin evidencias de pedogénesis. Los paleosuelos contenidos dentro de ellas, también son de color rojo. Este color podría ser debido a la liberación de hierro de los minerales primarios, por meteorización y/o pedogénesis. Su difusión dentro de la matriz y posterior oxidación, se propone como el mecanismo responsable del color dominante en las capas rojas del desierto de La Tatacoa.

PALABRAS CLAVE: Borrega; paleosuelos; Óptimo Climático del Mioceno Medio (MMCO); Villavieja.

ABSTRACT: From the Miocene of the Upper Magdalena Valley, Colombia, the La Venta and La Arenosa Groups stand out. In La Venta (13.8-11.6 Ma, post-oscillations), sedimentation was produced by alluvial and fluvial rivers that

^aFlórez-Molina, M. T. (2021). Condiciones paleoclimáticas miocénicas en las capas rojas y en los paleosuelos de los grupos La Arenosa y La Venta, Tatacoa, Huila, Colombia. *Rev. Fac. Cienc.*, 10(2), 82–104. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v10n2.92422>

^bUniversidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Materiales, Grupo GAIA, Sede de Investigación Universitaria, UdeA, <http://orcid.org/0000-0001-6623-3219>. CvLAC-RG: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod____rh=0000093025

* Autor para la correspondencia: maria.florez@udea.edu.co.

left huge pink sandy, silty and gravelly deposits at the base and roof, gray lithic layers and red, hard and weathered silts and paleosols inside. The Villavieja Formation excels within the group for its fossil richness and in it the Arenas Ferruginosas Unit. In this the paleosols (Sodic Haplotorrerts), were formed in a seasonally very contrasting climate, under a torrid regime (cold and humid winters and very hot and drier summers). The Sandy is contemporaneous with the Middle Miocene Climate Optimum (MMCO), the Middle Miocene Climate Transition (MMCT) and the Oxygen Isotopic Anomaly (Mi-3b). Its sedimentation was produced by huge mighty rivers that left gray sandy and silty deposits. In it, the La Borrega Formation stands out, which has four hard and weathered Red Packs (PC), contemporaneous with the MMCO. In the silts and sands that separate them, five paleosols (Lithic Haplusterts), formed in a seasonal climate, contrasted, under a ustic regime (cold and extremely humid winters). La Venta and La Arenosa have highly weathered red layers enriched in carbonates, salts, Fe and Al, without evidence of pedogenesis. The paleosols contained within them are also red. This color could be due to the release of iron from the primary minerals, due to weathering and / or pedogenesis. Its diffusion within the matrix and subsequent oxidation is proposed as the mechanism responsible for the dominant color in the red layers of the La Tatacoa desert.

KEYWORDS: Borrega; Optimal Climate of the Middle Miocene (MMCO); paleosoils; Villavieja.

1. INTRODUCCIÓN

Anomalías en $\delta^{18}O$ medidas en conchas de organismos marinos probaron que los océanos templados del mundo experimentaron amplias oscilaciones climáticas durante el Mioceno entre 17 – 11.6 Ma, las cuales tienen gran interés por su similitud con el cambio climático moderno. Esas oscilaciones constan de tres etapas:

1. Un periodo inicial cálido entre 17 – 14.8 Ma, donde se incrementó la temperatura (terrestres y marinas) entre 3 – 5°C por encima de las actuales, conocido como el Óptimo Climático Del Mioceno Medio (MMCO). Se desarrolló un clima seco que avanzó hacia una condición de aridez en casi todo el planeta, disminuyó la extensión de los bosques y se extendió la tundra y los desiertos.
2. Una Transición Climática del Mioceno (MMCT), entre 16.4 – 15.8 Ma, (Mi-2) y,
3. Un máximo de enfriamiento, con estabilización de las capas de hielo en la Antártida, una caída en el nivel del mar y un vuelco en la biota marina.

Entre 15.97 – 13.65 Ma, las temperaturas fueron más cálidas (Langhian). Mientras que entre 13.65 – 11.60 Ma, ligeramente más frías y la estacionalidad climática más contrastante (Mi-3b) (Serravallian), (Methner *et al.*, 2020; Peterson, 2018; Herbert *et al.*, 2016; Foster *et al.*, 2012; Cox *et al.*, 1993; Emiliani, 1992).

En la actualidad se trata de ver cómo se reflejan las oscilaciones de las temperaturas oceánicas micénicas (17 – 11.6 Ma) en las condiciones de estacionalidad con respecto a las temperaturas o humedad de los ambientes continentales. En particular, los estudios en paleosuelos han sido de gran ayuda, en tal sentido, Methner *et al.* (2020), indican que $\delta^{18}O_{\text{Carbonatos}}$ en paleosuelos europeos, revela que las temperaturas terrestres y marinas estuvieron sincronizadas durante el cambio climático extremo del MMCO-MMCT. La

Tatacoa, hace parte del Valle Superior del Magdalena y alberga, al menos, cuatro unidades litoestratigráficas continentales Terciarias, de piso a techo, Barzaloza (aprox 22 – 18 Ma). La Arenosa (15 – 17 Ma). La Venta (13.8 – 12 Ma) y Gigante (menos de 9 – 7 Ma) (Parra, 2018). La Arenosa y La Venta, están separadas por una discordancia y fueron depositadas entre 17 – 11.6 Ma, estas podrían relacionarse con el MMCO, MMCT y el Mi-3b.

Diversos autores en el desierto rojo han tratado de dilucidar el origen de las capas rojas y el de los paleosuelos. En la Formación Villavieja se conocen tres paquetes de capas rojas y al Este de ellas, otros cuatro paquetes de sedimentos con colores similares que hacen parte de la Formación La Borrega que es más antigua. Considerado este aspecto no queda duda de la importancia estratégica de la región frente a un entorno de cambio climático acelerado en el inmediato futuro, por lo cual, cobra gran relevancia la posibilidad de utilizar el pasado como clave del futuro.

Al respecto, Flórez *et al.* (2013, 2018) y Flórez-Molina (2018) comprobaron la existencia de paleosuelos alcalinos en las capas rojas inferiores y en la Unidad Arenas Ferruginosas de La Formación Villavieja. Estos autores, resaltaron la presencia de Vertisoles ricos en carbonatos y sodio, la variabilidad espacial en el espesor y en la posición de estos con respecto a las capas líticas. En su formación involucran procesos pedogenéticos de iluviación, lixiviación de arcilla, mineralización de la materia orgánica (MO), solodización, rubefacción, fersialitización, carbonatación, adensamiento y erosión hídrica. Dicha pedogénesis se llevó a cabo en un clima estacional contrastado en humedad (veranos largos, calientes y secos seguidos de otros lluviosos y cortos), condiciones prevalentes hasta poco después del evento global de enfriamiento Mi-3b. Estos autores proponen la liberación de hierro (Fe) desde los minerales primarios y su difusión dentro de la matriz del material geológico con su posterior oxidación, como el mecanismo responsable del color de las capas rojas en la Formación Villavieja.

Sotelo (2020), identifica e interpreta las condiciones paleoambientales asociadas con el régimen de humedad y sus posibles variaciones, dominantes durante la génesis de los paleosuelos en las capas Ferruginosa y La Venta, Miembro Baraya, en La Tatacoa. Este autor plantea que los indicadores geoquímicos permitieron estimar la cantidad de precipitación media anual (MAP) y la Temperatura Media Anual (MAT). Reporta valores entre 1261 – 1684 y entre 820 – 1307 mm/año en las capas Ferruginosa y La Venta, respectivamente. Dichos rangos coinciden con un régimen de humedad údico a ústico. Los cálculos de la MAT, arrojaron valores entre 12 – 23.6 y entre 13.3 – 19.3°C para las respectivas capas. Estos valores estarían indicando un régimen de temperatura térmica, con variaciones a méxico. Con estos datos el autor sugiere que, durante el Mioceno Medio, el desierto de La Tatacoa correspondía a una zona de vida de bosque húmedo, muy contrastante con el bosque seco que domina en la actualidad.

Este artículo hace parte de los resultados obtenidos en la investigación realizada durante el año sabático (2020-2021), en la cual se quiso comprobar:

- a) la existencia de paleosuelos en la Formación La Borrega (Grupo La Arenosa),
- b) las condiciones paleoclimáticas ocurridas durante su evolución,
- c) determinar si el color rojo de los paquetes colorados (PC) tenía el mismo origen que el de las capas líticas de la Formación Villavieja (Grupo La Venta) y,
- d) establecer su relación con los paleosuelos del intervalo 17 – 12 Ma.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

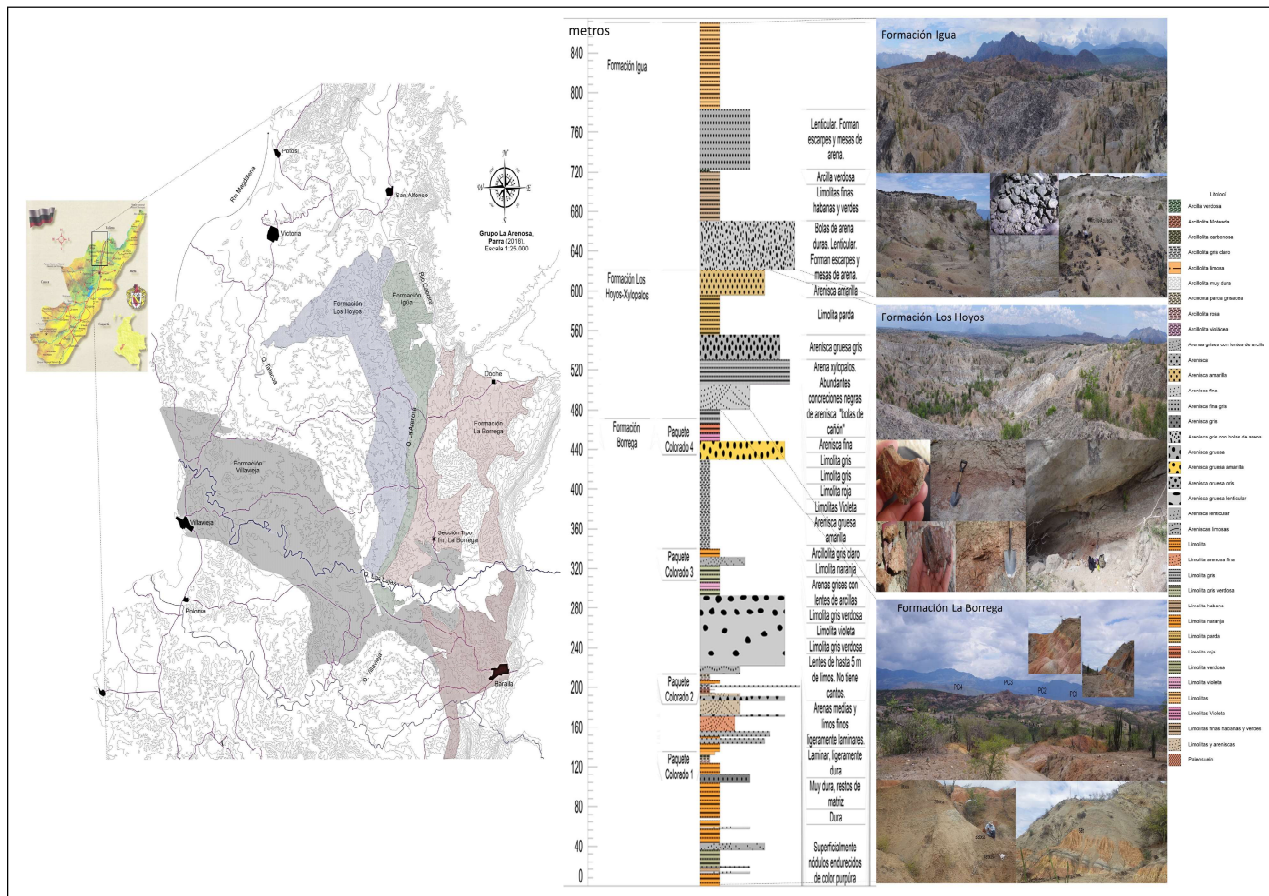
El desierto de La Tatacoa, se localiza en el Valle Alto del Magdalena, departamento del Huila (313' Norte y 7510' Oeste). La región está vegetada por ecosistemas secos, excepto en los bosques de galería donde persisten algunas especies no tolerantes a la sequía (Universidad Surcolombiana, 2006). El levantamiento de los paleosuelos se realizó sobre un transecto en la Vereda Espinaloza, a 8 km, desde el municipio de Baraya, al frente del Cerro El Bagal y cerca de la hacienda La Borrega. La sección tipo se ubicó en las coordenadas 312'47, 10" N y 755'10, 53" W (Figura 1) . En gran parte de la superficie de La Tatacoa, los suelos actuales son de tonalidad clara, parda, rojiza y amarillenta, algunas áreas de colores grises oscuros. Muchos de estos paleosuelos han sido erosionados y reemplazados por afloramientos rocosos.

2.2. Trabajo de campo

Se revisó la estratigrafía del Grupo La Arenosa (Parra, 2018) y la presencia de paleosuelos, los cuales, se describieron y se clasificaron (Soil Survey Staff, 2014). Tanto los paleosuelos, como algunas capas líticas se muestrearon para su descripción detallada, análisis de laboratorio y secciones delgadas para micromorfología. Se tomaron las respectivas fotografías de campo, se hicieron anotaciones y los respectivos diagramas estratigráficos.

2.3. Propiedades evaluadas en laboratorio

Las muestras de suelo y de las capas líticas colectadas en campo se llevaron a los laboratorios de la Universidad de Antioquia (UdeA) (GAIA, Catálisis y Absorbentes, Microscopia SEM) para los respectivos análisis físico químicos, de arcillas y microscopia electrónica. En el Laboratorio de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), se realizaron las secciones delgadas, las cuales fueron descritas en el GAIA, por microscopía óptica (Olympus CX31 utilizando objetivo de 10, 20 y 40x, de acuerdo con el requerimiento del detalle).



Inicialmente, las muestras se pesaron y se secaron en un horno durante 24 horas a 105°C, se disgregaron con rodillo de madera y se pasaron por un tamiz de 2mm. A las muestras secas y tamizadas se les midió el pH en una relación suelo y agua de 1 : 1. El contenido de bases intercambiables (Ca, Mg, K y Na) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), se determinaron por extracción con acetato de amonio 1M (pH 7), su cuantificación se realizó por absorción atómica, los resultados se expresaron en cmol (+) /kg suelo.

El porcentaje de materia orgánica (MO) se determinó por oxidación con dicromato de potasio y ácido sulfúrico (Walkley-Black). La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se determinó por la suma de bases extraídas con acetato de amonio normal y neutro, más la acidez intercambiabile extraída con KCl. El contenido de Fe, Mn, Cu y Zn, por el método de Olsen modificado. El fósforo disponible (P) por el método Bray II. Todos los elementos menores y el P se cuantificaron en mg/kg suelo (Flórez *et al.*, 2013, 2018).

Se realizó la caracterización mineralógica de las capas líticas del PCI y de los paleosuelos muestreados. Se tomaron fotografías en campo, en el laboratorio de todos los procesos, a la mineralogía óptica y de Barrido SEM y, a muestras de mano de paleosuelos y sedimentos líticos. Con los datos de laboratorio se calcularon los índices: Pedológico de Parker (1970), (WIP). De la relación limo-arcilla (L/Ar), (Van Wambeke, 1991; Young, 1976). El Porcentaje de arcilla (%Ar), (Birkeland, 1984; Wilding *et al.*, 1983). El Índice de la materia Orgánica (IMO) (Quiroga *et al.*, 2006; Honna *et al.*, 1988) y, el Índice de la relación hierro extraído por oxalato/ditionito, (Feo/Fed), (Shoji *et al.*, 1993). Los datos obtenidos de todos los análisis se reportan en la Tabla 1.

3. RESULTADOS

3.1. Grupo La Arenosa

Se trata de un paquete de sedimentos arenosos, limosos y arcillosos de colores grises, pardos y rojos definidos inicialmente por Henao (1950) a los cuales denomina “Arenosa Sandstones and siltstones”, les estima un espesor en 700 m y lo separa en tres subunidades sin asignarles nombres específicos. Anota que el conjunto podría ser del Mioceno medio y no es tan fosilífero como La Venta. Parra (2018), retoma esta información, precisa su delimitación y asigna nombres informales a las tres unidades a quien llama “formaciones” de techo a base así: Igua, Los Hoyos y La Borrega. Confirma la diferencia que estas tienen con La Venta a través del Monoclinal de La Venta. La Arenosa tiene rumbos cercanos a la línea N-S y pliegues de eje buzante (fallas inversas menores subparalelas a los ejes y otras subverticales). En la Figura 1, este autor muestra la extensión de este grupo bastante mayor al reportado por Henao (1950).

Parra (2018), en La Formación Igua, incluye otros dos cuerpos separados, uno en Aipe y otro en las cabeceiras de la quebrada Peralta e indica que al costado Oeste de Cerro Gordo existe una faja de esta formación en contacto discordante con la Formación Victoria y en cuyo extremo Sur se ha desarrollado el sinclinal de Las Acacias, acompañado de fallas subverticales NE-SW de corta extensión y una débil componente de rumbo.

Tabla 1: Resultados físico químicos realizados a los segmentos de paleosuelos y a las capas líticas del Paquete Colorado Uno (PCI), Formación La Borrega, Grupo La Arenosa, Tatacoa, Huila, Colombia. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1a. Propiedades* físicas y químicas. Fuente: Elaboración propia.

Horizonte	% A L		meq/100 gr de suelo								% SB PSI		mg/g suelo P Mn Cu Fe Al					
PALEOSUELOS ENTRE LOS PAQUETES COLORADOS 1 Y 2																		
Btkss	2.61	43.39	34	0.12	8.5	17.85	13.02	11.04	60.17	104.08	112.16	7.76	10.61	0.16	0.32	0.09	44.94	8.08
2Btkss	2.58	52.42	45	0.10	8.5	5.56	14.19	8.32	38.43	66.30	79.38	19.66	12.31	0.15	1.06	0.68	33.84	13.07
3Btkss	2.43	55.57	42	0.12	8.0	4.28	8.71	7.45	39.74	98.69	109.03	10.48	7.34	0.10	0.27	0.06	34.5	10.34
4Btkss	2.19	67.81	30	0.13	8.0	40.11	1.16	9.32	40.35	90.93	103.99	14.36	10.24	0.13	0.92	0.05	38.11	13.06
5Btkss	1.7	70.3	28	0.07	8.0	5.2	16.2	7.3	30.0	63.9	75.93	18.82	11.42	0.93	1.0	0.32	30.8	12.03
CAPAS LÍTICAS DEL PAQUETE COLORADO 1																		
sPCI	1.98	68.02	30	0.10	8.0	28.0	12.1	28.1	38.3	106.5	118.7	11.43	26.38	0.10	0.20	0.1	37.31	12.2
2PCI	0	5.0	95	0.14	8.0	1.41	2.35	4.92	34.83	43.50	131.68	0.0	11.31	0.03	0.03	0.09	11.39	7.93
PCI-1	1.98	8.02	90	0.10	8.0	42.73	27.86	14.13	38.41	123.13	126.09	2.40	11.47	0.18	0.10	0.03	27.31	20.02
PCI-2	2.13	22.87	75	0.10	8.0	1.31	6.93	3.74	65.25	77.23	80.23	3.88	4.84	0.18	0.03	0.02	13.28	2.96
PCI-3	2.19	7.81	90	0.08	8.5	0.98	3.07	3.76	32.74	40.54	45.96	13.42	9.28	0.13	0.03	0.02	14.68	2.99
PCI-4	2.07	13.93	84	0.06	8.5	1.18	6.19	5.15	37.74	50.26	54.35	8.13	10.25	0.13	0.79	0.03	23.13	5.44
PCI-5	2.07	13.93	84	0.06	8.5	1.23	3.97	5.08	35.87	46.15	54.05	17.18	11.02	0.23	0.05	0.03	26.05	4.10

* A. L. Ar: Arena, limo y arcilla. MO: Porcentaje de materia orgánica. CIC: Capacidad de Intercambio catiónico. CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico efectiva. %SB: Porcentaje Saturación de bases. %PSI: Porcentaje de sodio intercambiable. CIC = (Ca + Mg + K + Na). CICE = (Ca + Mg + K + Na + Al). %SB = [CIC / CICE] * 100. %PSI = (Na / CIC) * 100.

Tabla 1b. Índices pedológicos. Fuente: Elaboración propia.

Horizonte	A	L	Ar	IMO	Ca	Mg	Na	K	Na/0.35	Mg/0.9	K/0.25	Ca/0.7	WIP	L/Ar	Ca/Mg	Mg
PALEOSUELOS ENTRE LOS PAQUETES COLORADOS 1 Y 2																
Btkss	2.61	43.39	34	0.014	17.85	13.02	11.04	60.17	31.35	16.69	35.36	23.50	129.10	0.5	1.19	
2Btkss	2.58	52.42	45	0.014	5.56	14.19	8.32	38.43	23.77	15.77	35.36	7.94	82.84	1.16	0.39	
3Btkss	2.43	55.57	42	0.013	4.28	8.71	7.45	39.74	21.27	9.68	36.56	61.14	128.63	1.32	4.91	
4Btkss	2.19	67.81	30	0.013	40.11	1.16	9.32	40.35	26.62	1.29	37.12	57.30	122.32	2.26	34.63	
5Btkss	1.7	70.3	28	0.011	5.2	16.2	7.3	30.0	20.86	18.0	12.0	7.42	58.28	2.5	0.32	
CAPAS LÍTICAS DEL PAQUETE COLORADO 1																
sPC	1.98	68.02	30	0.1	28.0	12.1	28.1	38.3	80.28	13.44	153.2	40.0	186.92	2.26	2.31	
2PC	0	5.0	95	0.14	1.41	2.35	4.92	34.83	14.05	2.61	32.04	2.01	30.71	0.03	0.60	
PCI-1	1.98	8.02	90	0.1	27.86	14.13	38.41	42.73	40.36	30.96	35.34	61.05	167.70	0.09	1.53	
PCI-2	2.13	22.87	75	1.31	6.93	3.74	65.25	1.31	10.67	7.70	60.03	1.87	80.28	0.3	0.19	
PCI-3	2.19	7.81	90	0.98	3.07	3.76	32.74	0.98	10.75	3.41	30.12	1.39	45.67	0.08	0.32	
PCI-4	2.07	13.93	84	1.18	6.19	5.15	37.74	1.18	14.72	6.88	34.72	1.68	58.00	0.17	0.19	
PCI-5	2.07	13.93	84	1.23	3.97	5.08	35.87	1.23	14.53	4.41	33.00	1.75	53.68	0.17	0.31	

Tabla 1c. Valores de la relación Alo/Ald y Feo/Fed. Fuente: Elaboración propia.

Horizonte	Alo	Ald	Alo/Ald	Feo	Fed	Feo/Fed
PALEOSUELOS ENTRE LOS PAQUETES COLORADOS 1 Y 2						
Btkss	8.08	4.09	1.98	44.94	112.34	0.40
2Btkss	13.07	2.51	5.21	33.84	100.98	0.34
3Btkss	10.34	6.14	1.68	34.5	271.83	0.13
4Btkss	13.06	2.51	5.20	38.11	95.05	0.40
5Btkss	12.03	1.9	6.3	31.6	180.3	0.17
CAPAS LÍTICAS DEL PAQUETE COLORADO 1						
sPC	12.2	5.9	2.06	10.28	211.11	0.04
2PC	7.93	3.2	2.47	7.02	125.08	0.008
PCI-1	2.96	6.93	0.43	13.28	411.11	0.03
PCI-2	2.99	4.01	0.75	14.68	427.4	0.03
PCI-3	5.44	4.17	1.31	23.13	323.69	0.07
PCI-4	4.10	3.69	1.11	26.05	369.62	0.07
PCI-5	7.93	3.02	2.63	11.39	315.0	0.04

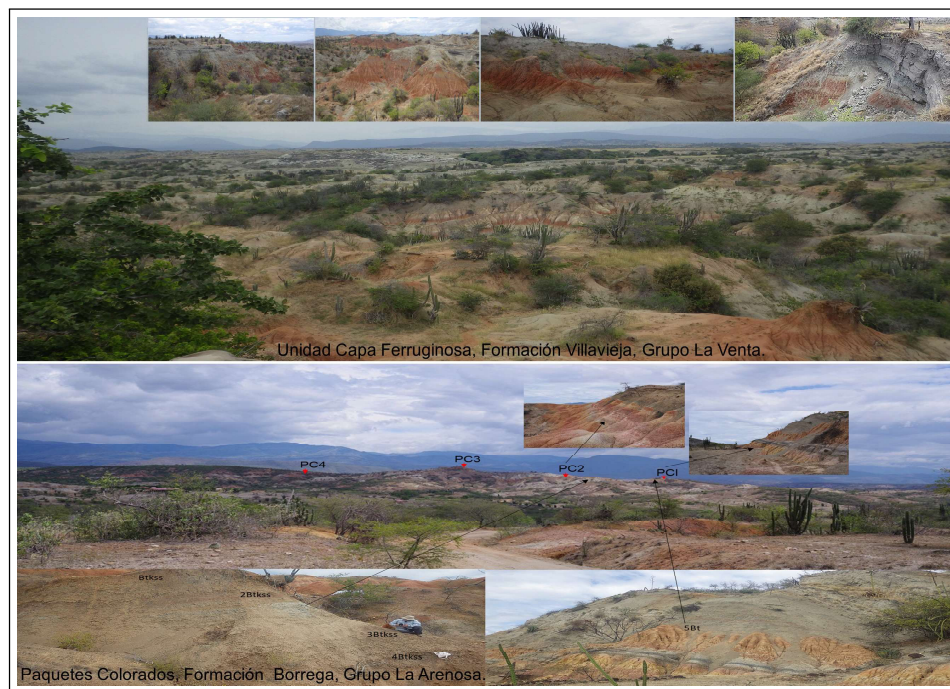


Figura 2: En la parte superior fotografías de la Unidad Arenas Ferruginosas en la Formación Villavieja, Grupo La Venta. En la parte inferior fotografías de la Formación La Borrega, Grupo La Arenosa. En ambas formaciones se observan capas rojas, dentro de ellas, paleosuelos, Tatacoa, Huila, Colombia. Fuente: Elaboración propia.

El flanco Este, formado, por al menos, cinco bancos gruesos de areniscas separadas por limolitas (Figura 1).

Para la Formación Los Hoyos destaca tres bancos muy espesos de areniscas grises, en especial, la arenisca del techo que es bien reconocible por su carácter fuertemente noduloso y algunos lentes ricos en feldespato. Grandes fragmentos de xilópalos son comunes, Figura 1. En esta formación se encontró un paleosuelo (BTSS), en el borde derecho, aguas abajo, de la quebrada Los Hoyos (314'39" N y 7506'02" W), formado a partir de un pantano dado su contenido de tallos de ciperáceas y las condiciones redoximórficas que presenta, clasificado como Vertic Rhodoxeralfs. Para La Borrega, resalta su espesor en alrededor de 480 m, indica que consta de limolitas, arcillolitas y areniscas que varían internamente en espesor y color desde pardo claro, pardo rojizo hasta gris, duros y ásperos al tacto. Entre estos sedimentos se incluye, al menos, cuatro paquetes colorados (PC) muy notorios que sirven de capas guías, aunque varían en espesor entre 6 y 12 m. Dichos sedimentos son limo-arcillosos, de coloraciones desde granate, rojo, ocre hasta naranja y, su parte basal redoximórficas.

Los PC fueron nombrados de base a techo como: *PCI*, *PC2*, *PC3* y *PC4*. Todos son ligeramente similares y están separados por capas líticas que alternan entre areniscas grises (finas y medias) y limos y limos arcillosos (pardos a pardo rojizos, muy duros altamente alterados). Entre los *PCI* – *PC2* se encontraron cinco paleosuelos, separados, entre sí, por capas líticas, Figura 2.

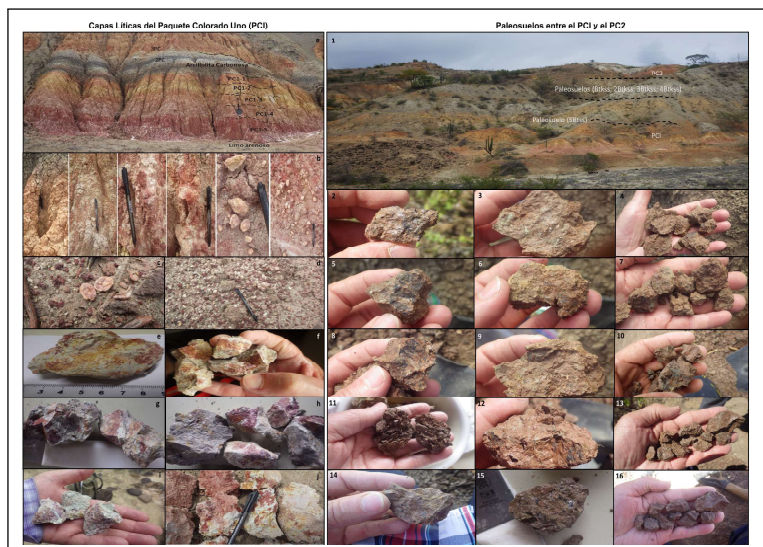


Figura 3: Evidencias de alteración en capas líticas del *PCI* (imágenes izquierda) y, de los rasgos pedogenéticos en los paleosuelos *PCI* y *PC2* (imágenes derecha), La Borrega, Tatacoa, Huila, Colombia. En las capas líticas (a) se resaltan materiales fuertemente alterados, sesquióxidos y óxidos de Fe y Mn (a, b, c, d), hematita y goethita (e, f, g, h) en minerales, tejidos, agregados y rellenando grietas. Moteos amarillos, marrones, rojos, granates y negros (e, f, g, h, i, j). En los paleosuelos (1) los rasgos pedogenéticos más evidentes son el color pardo a pardo rojizo oscuro, estructura en Bsa y cuneiforme (4, 7, 10, 13, 16), slickensides (2, 12, 15), manganes (2, 5, 8, 12), argílanes (6, 8, 9, 12, 14), ferranes (7, 12), carbonatos de calcio (3, 8, 9). Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Descripción de techo a base del Paquete Colorado Uno (*PCI*)

Se describe en detalle el *PCI* (base de la formación La Arenosa) como referencia para los otros tres paquetes. Este tiene siete capas líticas continuas, nombradas de techo a base, como: *3PCI*, *2PCI*, *PCI* – 1, *PCI* – 2, *PCI* – 3, *PCI* – 4 y *PCI* – 5. En las Figuras 3, 4 y 5, se presenta las evidencias de alteración, mineralogía (óptica y de barrido SEM), Difracción de Rayos X (DRX) y la micromorfología, respectivamente. En la Tabla 1, se expresan los resultados (Propiedades físicas y químicas (Tabla 1a), Índices pedológicos (Tabla 1b) y Relación Alo/Ald y Feo/Fed (Tabla 1c)).

3PCI: 7.2 m. Capa lítica limosa, color 5YR5/8 (rojo amarillento) con 20% de color 5YR6/1 (gris). Sin estructura, masiva y muy dura. Ligeramente plástica (Lp) y ligeramente pegajosa (Lp). Límites netos, el superior marcado por la presencia de un paleosuelo poco desarrollado y el inferior por una arcilla carbonosa. Su mineralogía la integran piroxenos, anfíboles, plagioclasas y feldespatos, algunas biotitas y cuarzos pequeños, circones largos. Algunos minerales con superficies o bordes impregnados por óxidos de Fe y Mn, estos, a veces, están como agregados o placas aislados (Figuras 3, 4 y 5).

2PCI: 2.2 m. Arcilla carbonosa con intercalaciones laminares que varían entre un gris oliva (5Y5/2) con manchas pardo rojizo oscuro (2.5YR3/4) en los extremos y en el centro un gris muy oscuro casi negro

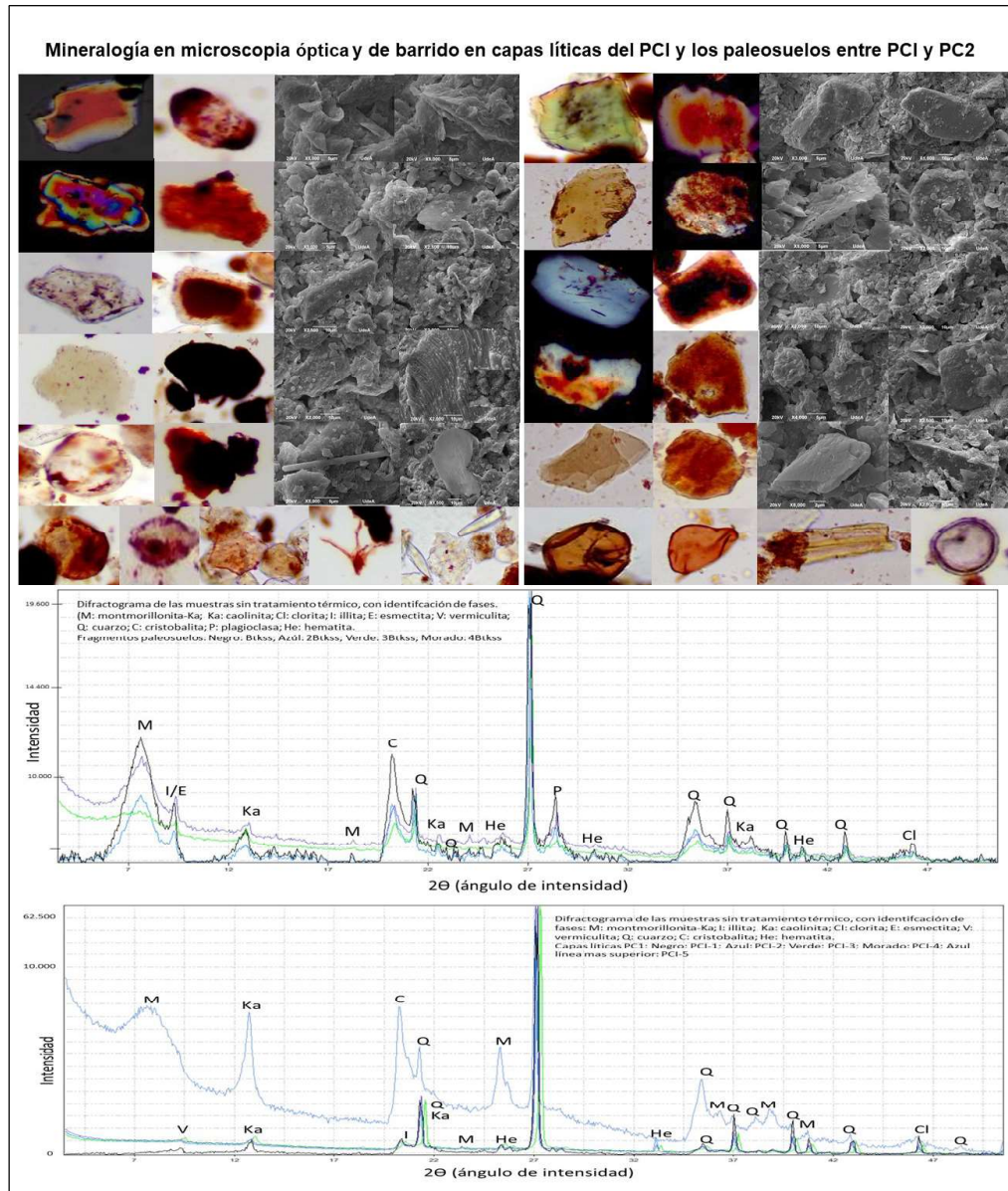


Figura 4: Mineralogía en las capas líticas del PCI (izquierda) y, en paleosuelos localizados entre PCI y PC2 (derecha). Observe en ambos casos, el recubrimiento de óxidos de Fe y Mn en minerales y su estado de alteración. Partículas orgánicas y diatomeas en capas líticas, mientras que en los paleosuelos polen y esporas de color ocre. Abajo los diagramas de DRX, el superior corresponde a los paleosuelos y el inferior a las capas líticas, La Borrega Tatacoa, Huila, Colombia. Fuente: Elaboración propia.

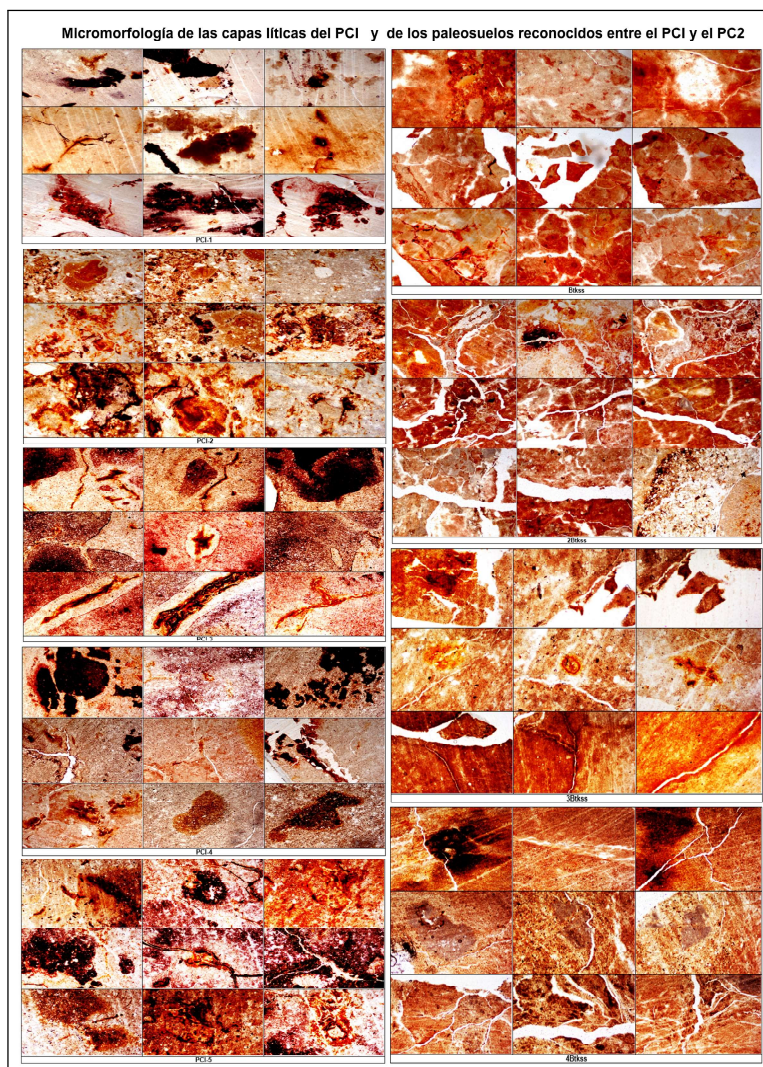


Figura 5: Micromorfología en capas líticas del PCI (izquierda) y de los paleosuelos (derecha) entre PCI y PC2. En las capas líticas, su orden de arriba hacia abajo es PCI-1 a 5. Observe la matriz muy fina. Grumos, coloides, impregnaciones o moteos, bordeando poros o llenándolos, son blancos, pardos, rojos, naranja, violeta, granate y negro, a veces nucleando la alteración mineral. El Fe y el Mn parecen cementar la matriz. Todo ello evidencia mal drenaje y saturación estacional de agua. En los paleosuelos, nombrados de arriba abajo Btkss-2Btkss-3Btkss-4Btkss, la matriz es fina, pardo a clara a parda oscura, birrefringente y con carbonatos. Poros definen la estructura en Bsa, algunos peds cuneiformes arrastrados. Son comunes arglones, ferránicos y manganeses. La Borrega, Tatacoa, Huila, Colombia. Fuente: Elaboración propia.

(G13/N), dura. pH 8.0. Moderada reacción al HCl. Límites superior e inferior netos, definidos por un cambio litológico y de color que la diferencian claramente de las demás y reconocible en todo el transecto. Los minerales son feldespatos y plagioclasas, algunos tienen en la superficie agregados de color negro, púrpura, granate, pardo y naranja (óxidos de Fe, Mn, hematita o goethita), que pueden llegar a invadir todo el cristal (apariciencia masiva e irregular, sólida o tiñendo la matriz). Escasos tejidos orgánicos, bien conservados, oxidados o ennegrecidos. Las arcillas identificadas son montmorillonita-esmectita, illita, caolinita, clorita, vermiculita, cristobalita y hematita (Figuras 3, 4 y 5).

PCI-1: 3.2 m. Limo arcilloso, duro. Color pardo grisáceo ligeramente amarillento (5Y5/2). Sin estructura. pH 8.0. Moderada reacción al HCl. Evidencias superficiales de chorreaduras de carbonatos de color pardo claro que forman aglomeraciones redondeadas ásperas, como canales de escurrimiento o pseudo “castillos de bruja”. Límite superior definido por un cambio de color neto con la arcilla carbonosa y el inferior transicional.

Hay piroxenos, feldespatos, plagioclasas, circones e hiperstenas, muy pequeños. Algunos cristales tienen adherencias de color negro, púrpura, granate, pardo y naranja, a veces, invaden todo el cristal o se agrupan como masas irregulares sólidas o tiñendo la matriz. Escasos tejidos. Se diferencian montmorillonita, esmectita, caolinita con evidencias de disolución y redondeamiento de bordes, así como algunos microfósiles.

Las arcillas son illita, caolinita, clorita, vermiculita, cristobalita y hematita. Matriz muy fina de color pardo claro y/o grisáceo con tonalidades rojas hasta naranjas o ligeramente violeta o granate. Abundantes grumos irregulares de colores que pueden variar desde rojo, naranja, negro o granate, recubriendo parcial o totalmente cristales. Escasas grietas de expansión, estrechas y poros irregulares pequeños, algunos rellenos de “óxidos” de color negro, naranja, ocre o granate (Figuras 3, 4 y 5).

PCI-2: 0.50 m. Limo arcilloso, extremadamente duro. Color gris claro (5YR7/1) pero hacia el techo se vuelve rojo amarillento (5YR5/6), en todo el espesor se observan manchas en un 50 % de color rosa (7.5YR7/4). Sin estructura. pH 8.0. Moderada reacción al HCl. Evidencias superficiales de chorreaduras de carbonatos de color pardo claro que forman aglomeraciones redondeadas ásperas, formando canales de escurrimiento. Límites transicionales.

Se observan piroxenos, feldespatos, plagioclasas, cuarzos redondeados, circones. Agregados de color negro, púrpura, granate, pardo y naranja en sus superficies, invadiendo el cristal, individuales como masas irregulares sólidas o, tiñendo la matriz. Escasos tejidos orgánicos, pobremente conservados, oxidados o ennegrecidos por el Mn. Hay tecamebas y diatomeas, esporas e hifas de hongos escasos. Arcillas tipo clorita, esmectita, montmorillonita, illita, caolinita, clorita, vermiculita, cristobalita y hematita.

Matriz fina a ligeramente gruesa, de color pardo grisáceo con abundantes agregados geoides de color naranja

fuerte y negro que tiñen parcialmente la matriz. Muchos minerales félsicos y casi todos están recubiertos por estos “óxidos” o “geles” o están manchados, probablemente hematita. No se observan grietas ni poros, no hay estructura y toda la matriz se ve muy densa (Figuras 3, 4 y 5).

PCI-3: 1.30 m. Arcilloso, muy duro. Color rosa (2.5YR6/4), con zonas más blancas, gris claro (5YR7/1), posiblemente parte de la matriz. Localmente manchas de hasta 2 cm de diámetro de color pardo fuerte (7.5YR5/8). Sin estructura. pH 8.5. Fuerte reacción al HCl. Evidencias superficiales de chorreaduras de carbonatos de color pardo claro que forman aglomeraciones redondeadas ásperas, creando pseudo canales de escurrimiento. Límites transicionales.

Se diferencian piroxenos, feldespatos, plagioclasas, cuarzos redondeados, circones. Agregados negros, púrpura, granate, pardo y naranja en las superficies de los minerales, en algunos casos, llegan a invadir el cristal, en agregados irregulares e individuales como masas sólidas o tiñendo la matriz. No hay tejidos vegetales o animales. Arcillas como illita-esmectita con óxidos de Fe en las superficies, caolinita, clorita, vermiculita, cristobalita y hematita.

Matriz muy fina de color pardo claro con tonalidades roja, naranja, violeta y granate hasta negra, fuertes, muy definida. Algunos poros muy pequeños y redondos otros muy grandes, pero escasos. Se observan canales rellenos por otro material ligeramente más claro y, dentro de ellos, grietas rellenas de óxidos o agregados de color naranja y negro, con aspecto como de “chorreaduras”. Algunas formas de minerales pero no distinguibles al ojo, los cuales presentan manchas granate, naranja y negras en bodes y superficies, casi siempre al centro de ellos. La mayor concentración de estas, da la apariencia de “nucleación” o, el inicio de la alteración de los minerales (Figuras 3, 4 y 5).

PCI-4: 0.40 m. Limo arcilloso, extremadamente duro. Color pardo rosado claro (2.5YR6/4), con manchas en un 30 % pardo oscuro (2.5YR3/6) que aumentan y van tiñendo toda la matriz, localmente se hacen más intensas, pardo fuerte (7.5YR5/8). Con nódulos endurecidos de hasta 5 cm de diámetro y distribuidos en toda la matriz. Sin estructura. Presentes slickensides estriados. pH 8.5. Moderada reacción al HCl. Evidencias superficiales de chorreaduras de carbonatos de color pardo claro que forman aglomeraciones redondeadas ásperas y canales de escurrimiento. Límites transicionales.

Hay augita, enstatita, hiperstena, feldespato, plagioclasas, clorita y circones largos y anchos, incoloros o con una tenue coloración rosa. En superficies de minerales agregados de color negro, púrpura, granate, pardo y naranja que en algunos casos, los invaden por completo, también se encuentran individuales como masas irregulares sólidas o tiñendo la matriz. Escasos tejidos orgánicos, pobremente conservados, oxidados o ennegrecidos por el Mn. Hay hifas de hongos. Arcillas tipo montmorillonita, illita, caolinita, clorita, vermiculita, cristobalita, hematita y chorreaduras de óxidos de Fe.

Matriz muy fina de color pardo claro manchada de color naranja, violeta, granate y negra. Algunos poros pequeños. Se observan grietas y canales amplios rellenos por otro material ligeramente más oscuro, posiblemente óxidos o agregados de color naranja y negros. Algunos minerales solo distinguibles por sus formas, están completamente recubiertos por un material negro y sus bordes, que forman como un halo, son de color naranja (goethita), este recubrimiento también se observa en la matriz, en donde igualmente, existen coágulos oxidados de color naranja (limonita) y, manchas granates, localizadas (Figuras 3, 4 y 5).

PCI-5: 0.40 m. Limo arcilloso, extremadamente duro. Color gris pálida (5YR7/1), con manchas en un 10 % pardo oscuro (2.5YR3/6) y en un 2 % pardo fuerte (7.5YR5/8). Sin estructura, con algunas grietas poco profundas. Presentes slickensides estriados. pH 8.5. Moderada reacción al HCl. Evidencias superficiales de chorreaduras de carbonatos de color pardo claro que forman aglomeraciones redondeadas ásperas, como canales de escurrimiento o pseudo “castillos de bruja”. Igualmente, numerosas placas de menos de 1 cm de diámetro muy duras de color purpura ubicadas en resaltos de canales o pedestales, estos muy duros como “pequeñas piedritas”. Límites transicionales.

Los minerales son augita, enstatita, hiperstena, feldespato, plagioclasas, cloritas y circones largos y anchos, incoloros o con una tenue coloración rosa. En muchos de ellos agregados de color negro, purpura, granate, pardo y naranja en sus superficies o invadiéndoles, como masas irregulares sólidas o tiñendo la matriz. Arcillas como montmorillonita-smectita, caolinita, clorita, vermiculita están presentes. Igualmente, cristobalita, hematita y óxidos de Fe.

Matriz muy fina de color pardo claro con tonalidades blanca, roja, naranja, violeta, granate y hasta negra, las cuales aparecen como grumos, coloides, impregnaciones o manchas en la superficie de la matriz, bordeando un poro o un canal y, por lo general, está acompañado de un grumo del mismo color que da la apariencia de ser “núcleos” a partir de los cuales se comenzara la alteración de minerales. Se observan escasas grietas de expansión y poros irregulares, libres o rellenos de “óxidos” de color negro, naranja, ocre o granate (Figuras 3, 4 y 5).

En general, los materiales del Paquete Colorado Uno (PCI), están fuertemente alterados e influenciados por la presencia de sesquióxidos y óxidos de Fe y Mn, hematita y goethita que trabajan como agentes cementantes de minerales, tejidos vegetales, agregados y relleno de grietas. Los moteados de coloración amarillenta a amarronada, hasta granate y negra, están presentes en todas las capas líticas, indicando condiciones de mal drenaje y evidenciando una probable estacionalidad en la saturación de agua, además, son extremadamente duras.

Todas las capas líticas de acuerdo a la Tabla 1a, presentan texturas Limo Arcillosas (LAr), bajo contenido de MO (0.06-0.1 %). Reacción débilmente alcalina (pH entre 8.0 – 8.5). Moderado a bajo contenido de bases que determinan una moderada capacidad de intercambio catiónico (CIC) (6.54 – 123.13 meq/100 gr

suelo). Los contenidos de bases y la CIC son más altos en *3PCI* y *PCI* – 1. El *Al* es bajo (2.96 – 20.02 mg/g suelo), lo que implica una CICE con valores bajos (45.98 – 131.68 meq/100 gr suelo), excepto en *3PCI*, *2PC* y *PCI* – 1, que son un poco más altos.

El %SB es menor del 40 % y el %PSI menor del 15 % para todas las capas líticas, excepto para *3PC* (26.38 %). Los valores de Fe relativamente moderados (11.39 – 37.31 meq/100 gr suelo) y, los contenidos de P, Mn y Cu, muy bajos (0.03 – 0.23.0.05 – 0.79.0.02 – 0.1 meq/100 gr suelo, respectivamente). Los valores del *WIP* (Tabla 1b), en las capas líticas del *PCI*, confirman el alto estado de alteración, así como el IMO el bajo contenido de *MO*. En la Tabla 1c, las relaciones de Fe y Al, fueron muy bajas, lo que podría corresponder con estados de Fe más cristalino (goethita, hematita), las relaciones Feo:Fed, extremadamente bajas, así lo confirman. El $Alo > Ald$, se debe a la presencia de alumino-silicatos de bajo grado de cristalinidad. Los valores bajos en $Alo : Ald$, indican que el bajo *Al* activo hace parte de compuestos amorfos.

3.1.2. Descripción de los paleosuelos en la Formación La Borrega

Entre los paquetes colorados *PC1* y *PC2*, se encontraron cinco segmentos de paleosuelos separados entre sí por capas líticas, nombrados de techo a base: Btkss; 2Btkss; 3Btkss; 4Btkss y 5Btss. En las Figuras 3, 4 y 5, se muestran evidencias pedogenéticas. La mineralogía óptica y SEM y, la DRX y, la micromorfología. En la Tabla 1, los resultados físicos químicos.

Btkss: 0.20 m. color pardo rojizo oscuro (2.5YR2.5/4). Franco arcilloso. Estructura en bloques subangulares, algunos cuneiformes finos y medios, fuertes. Plástico, no pegajoso. Comunes argílanes y manganes. Abundantes poros y algunas raíces finas. Están presentes slickensides, bien definidos y grietas que delimitan bien los bloques. pH 8.0. Moderada reacción al HCl. Límites superior e inferior netos definidos por cambios litológicos, en el superior arcillas redoximórficas y en el inferior limos de color gris oliva.

Dentro del paleosuelo se encuentran placas de hasta 2 cm de carbonatos de calcio. Se observa augita, enstatita, hiperstena, hornblenda verde, feldespato potásico (sanidina) y plagioclasas (andesina), biotitas pardas, circones y cuarzo bipiramidal ligeramente redondeados. Cristales con adherencias de óxidos de Fe y Mn, recubriendo parcial o totalmente, como agregados o placas sólidas duras. Circones anchos y pequeños rosa, pardos y/o incoloros. Escasos tejidos orgánicos, bien conservados, principalmente vegetales, oxidados o ennegrecidos por el Mn. Arcillas tipo montmorillonita, illita-esmectita, caolinita, cristobalita y hematita.

Matriz fina de color pardo claro a rojiza con manchas de color naranja fuerte. Está constituida por dos materiales diferentes el más claro presenta más manganes mientras que el más rojo más ferranes, concordante con diferentes estados de oxidación. Estructura en bloques subangulares “cuneiforme”, algunos de ellos han sido arrastrados hacia poros grandes o canales irregulares que definen los peds y también albergan ferranes incipientes. Abundantes poros medios y finos, amplios e irregulares, algunos con bordes muy

oxidados. Localmente, agregados negros y manchas de hematita o, rellenando pequeños poros irregulares. Cristales redondeados de cuarzo y estos, al igual que las augitas y los feldespatos recubiertos de óxidos de Fe. Algunos piroxenos y circón son arrastrados hacia los bordes de los peds. Este paleosuelo se clasifico como Lithic Haplusterts, su desarrollo es incipiente, Figuras 3, 4 y 5.

2Btkss: 0.30 m. Limo arcilloso. Color pardo rojizo oscuro (5YR3/3). Estructura en bloques subangulares medios y gruesos, algunos peds cuneiformes, fuertes. Plástico, no pegajoso. Argílanes y manganos bien definidos. Poros finos. Presentes slickensides y grietas. pH 8.5. Fuerte reacción al HCl. Límites netos definidos por cambios litológicos, el superior por limos crema y el inferior por una arenisca parda. Dentro del paleosuelo se encuentran pequeñas drusas de pirolusita muy bien cristalizada de hasta 1 mm y placas de hasta 2 cm de carbonatos de calcio.

Se observa augita, enstatita, hiperstena, hornblenda verde, sanidina y andesina, abundantes biotitas pardas, algunos circones muy pequeños, cuarzos y fragmentos líticos. Óxidos de Fe y Mn en superficies de minerales, no tan fuerte como en el paleosuelo Btkss y es más notoria la presencia de manganeso. Los piroxenos tienen bordes agudos en forma de huso, la mayoría de los cristales son de origen volcánico y poseen inclusiones sin orientación. Escasos tejidos vegetales bien conservados, semillas ovaladas y restos de raíces muy finas, oxidadas o ennegrecidas, recubriendo parcial o totalmente cristales. Agregados o placas negras sólidas y duras. Las arcillas son illita, esmectita, caolinita y montmorillonita.

Matriz fina, de color pardo claro a pardo rojiza con manchas de color naranja fuerte birrefringente. Muy bien desarrollado, presenta todas las cualidades de un Vertisol. Estructura en bloques subangulares muy bien definida, abundantes poros finos, medios y gruesos que definen bloques cuneiformes. Algunos poros rellenos de arcilla iluvial o con agregados de calcita, otros, con bordes de óxidos de hierro y/o manganeso (argílanes y manganos, en forma de arandelas). Localmente, en las superficies se observan concentraciones de arcilla iluvial y agregados de minerales que cambian la textura de la matriz haciéndola ligeramente más gruesa. Este paleosuelo se clasifico como Lithic Haplusterts, Figuras 3, 4 y 5.

3Btkss: 0.30 m. Limo arcilloso. Color pardo amarillento oscuro (5YR3/4). Estructura en bloques subangulares finos, débiles, algunos peds cuneiformes. Plástico, ligeramente pegajoso. Abundantes argílanes y manganos. Poros muy finos. Presentes slickensides estriados, bien definidos y grietas verticales. pH 8.0. Moderada reacción al HCl. Abundantes placas de carbonato de calcio débiles y de hasta 2 cm de diámetro. Límites superior e inferior netos, definidos por un cambio litológico, el superior un limo amarillento y el inferior un limo grisáceo con tendencia a formar bolas de hasta 6 cm de diámetro.

Se observa augita, enstatita, hiperstena. Biotitas pardas y verdosas. Sanidina, andesina y cuarzos redondeados. Circones anchos, pequeños e incoloros, algunos como inclusiones en plagioclasas. La mayoría de los cristales tienen superficies con adherencias de óxidos de Fe y Mn. Escasos tejidos orgánicos, bien con-

servados, principalmente vegetales, oxidados o ennegrecidos por el Mn. Algunas esporas de color ocre. Hay esmectita, caolinita, illita, montmorillonita, albita, sanidina y enstatita.

Matriz fina de color pardo claro a rojiza con manchas de color naranja fuerte. Estructura en bloques subangulares, algunos han sido arrastrados hacia poros grandes o canales irregulares que definen una pedialidad bien desarrollada. Abundantes poros medios y finos e irregulares, varios rellenos totalmente por ferranes y/o en sus bordes manganos como también en superficies de cristales, aislados en forma de arandelas o recubriendo peds. Abundantes cristales de feldespatos y plagioclasas con adherencias de óxidos de hierro y manganeso. Arcilla iluvial y otros minerales como circones, piroxenos, cuarzos y opacos logran ser reconocidos. Este paleosuelo se clasificó como Lithic Haplusterts, no es tan desarrollado como el 2Btkss, pero sí más que el Btkss, Figuras 3, 4 y 5.

4Btkss: 0.20 m. Limo arcilloso. Color pardo rojizo (5YR4/4). Estructura en bloques subangulares, medios y gruesos, fuertes, algunos cuneiformes. Plástico, no pegajoso. Abundantes argílanes y manganos bien definidos. Poros finos. Slickensides y grietas. pH 8.5. Fuerte reacción al HCl. Límites netos definidos por cambios litológicos, el superior un limo amarillento y el inferior un limo grisáceo con tendencia ovoide. Cristales de augita, enstatita, hiperstena, hornblenda verde. Biotitas pardas, circones largos y estrechos con adherencias de óxidos de Mn. Escasos tejidos orgánicos, bien conservados, oxidados o ennegrecidos por el manganeso. Se destacan las esporas y restos de tecamebas. Las arcillas son montmorillonita, illita-esmectita, caolinita.

Matriz fina, de color pardo claro a pardo oscura, muy birrefringente y con carbonatos, es muy similar al 2Btkss. Estructura en bloques subangulares, abundantes poros finos, medios y gruesos que definen peds cuneiformes. Poros rellenos de peds y/o del material de la matriz que ha sido arrastrada. Abundantes argílanes, ferranes y manganos en superficies de peds o en bordes de poros. Los cristales son muy pequeños, escasamente se diferencian por el pleocroísmo pero no alcanzan a ser bien reconocidos por las adherencias de ferranes o manganos. Este paleosuelo se clasificó como Lithic Haplusterts, Figuras 3, 4 y 5.

5Btss: 0.30 m. Limo arcilloso. Color pardo rojizo (2.5YR4/3). Estructura en bloques subangulares, finos, débiles. Plástico, pegajoso. Argílanes y ferranes en caras de fricción. Poros finos. pH 8.0. Sin reacción al HCl. Límites netos definidos por cambio litológicos, el superior un limo amarillento y el inferior un limo grisáceo con tendencia ovoide.

Augita, enstatita, hiperstena, hornblenda verde, sanidina y andesina. Biotitas pardas, circones y cuarzo bipi-ramidal, algunos redondeados. Los circones son anchos y pequeños rosa, pardos o incoloros. Óxidos de Fe y Mn, recubriendo parcial o totalmente cristales. También como agregados o placas sólidas duras. Escasos tejidos orgánicos, bien conservados, principalmente vegetales, oxidados o ennegrecidos por el manganeso. Este paleosuelo se clasificó como Lithic Haplusterts, su desarrollo es muy incipiente y no presenta carbona-

tos, pero si slickensides y la partición característica de los Vertisoles, Figuras 3, 4 y 5.

Desde el punto de vista físico-químico (Tabla 1a), estos paleosuelos presentan texturas Franco Arcillo Limosa (FARL), un bajo contenido de MO (0.07-0.13 %). Reacción débilmente alcalina (pH entre 8.0-8.5). Alto contenido de bases que determinan una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) (63.9-104.08 meq/100 gr suelo), más altos en Btkss y 3Btkss, esto se refleja en los valores de la CIC y la CICE. El Al es relativamente alto (8.08-13.07 mg/g suelo), lo que permite calcular una CICE alta (75.93-103.99 meq/100 gr suelo).

El %SB en todos los paleosuelos fue menor del 40%, indicando de saturación, propio para zonas áridas, además, que el Ca^{+2} y Mg^{+2} y, K^{+} , predominan sobre el Al. El %PSI está dentro del rango normal en todos los paleosuelos siendo menor de 15% y menor de 4 ds/m, lo que muestra el bajo contenido de sales. El Fe fue relativamente alto (30.8-44.94 meq/100 gr suelo). Mientras que el P, Mn y Cu, bajos (0.1-0.93. 0.27-1.06. 0.06-0.68 meq/100 gr suelo, respectivamente). La química de estos paleosuelos indica que tienen grandes posibilidades de intercambio catiónico, la cual, esta generada por la presencia de montmorillonita y esmectita, esencialmente. En esta fase intercambiable se observa altos niveles de Ca^{+2} , Mg^{+2} y, muy altos de K^{+} ; sin embargo, la relación $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{K}^{+}$ es muy baja (0.51 – 1.29) lo que indica la posibilidad de un buen funcionamiento del K^{+} , en los procesos de absorción.

Los paleosuelos están muy alterados (Tabla 1b), de ellos, solo el 5Btss, estaría en menor grado, lo cual concuerda con su bajo desarrollo pedogenético. El 2Btkss es el de mejor desarrollo pero no tan meteorizado. Los minerales están alterados, hay destrucción de micas y feldespatos, se modificó la mineralogía detrítica y se presentaron minerales de neo formación (arcillas). El IMO, es bajo confirmando el despreciable contenido de MO.

De acuerdo con la Tabla 1c, las relaciones de Fe y Al, fueron muy bajas. El %Fe cristalino, los oxihidróxidos y los amorfos altos (> 30 % del Fe total, valor que se asocia con un alto estado de alteración). Las relaciones Feo:Fed fueron extremadamente bajas, lo que hace evidente que estos paleosuelos alcanzaron un importante grado evolutivo, no el más óptimo. En todos, el $A_{lo} > A_{ld}$, indica la presencia de aluminosilicatos de bajo grado de cristalinidad (amorfos).

4. DISCUSIÓN

Las rocas sedimentarias Miocénicas de La Tatacoa poseen fósiles que han permitido:

- a) reconstruir las condiciones climáticas durante su depositación,
- b) dilucidar como se alteraron hasta alcanzar tonalidades rojizas y,

- c) dar paso a diversos procesos pedogenéticos que dieron paso a la formación de paleosuelos dentro o entre las capas líticas.

De todo el sedimentario miocénico del Valle Superior del Magdalena, se resaltan las unidades La Venta y La Arenosa. En ellas varios autores han trabajado con detalle la Formación Villavieja (Grupo La Venta), por su riqueza fosilífera, litología, estructuras y paleosuelos. Como contraposición, La Formación la Borrega (Grupo La Arenosa), ha sido poco explorada o erróneamente incluida dentro de La Venta, porque también tiene paquetes de sedimentos rojos, Henao (1950), precisa su litoestratigrafía y Parra (2018), la ubica como más antigua y cercana a 14 Ma.

Foster *et al.* (2012), indican que las oscilaciones del Mioceno Medio (MMCO - MMCT - Mi3b) ocurrieron entre 17-11.6 Ma, de tal modo que, al menos, parte de estas oscilaciones climáticas podrían estar registradas en La Arenosa. Al respecto, Montes *et al.* (2021), reubica la muestra JG-R90-3, en la unidad más baja de la Formación La Victoria (Capa San Alfonso), lo que se constituye en la segunda edad más antigua dentro de la secuencia (13.778 ± 0.081 Ma, Ar/Ar en biotita, (Flynn *et al.*, 1997). La sedimentación de La Arenosa fue producida por enormes ríos caudalosos que dejaron grandes llanuras de inundación en donde predominaron depósitos lineales arenosos y limosos enriquecidos por volcanoclastos de un volcanismo inmaduro andesítico. El color de los sedimentos es esencialmente gris, excepto, en la Formación La Borrega, en donde alternan con limos pardos amarillentos y cuatro paquetes colorados de aspecto muy similar al de las capas rojas de la Formación Villavieja. Los paquetes colorados tienen numerosas manchas o moteos de colores fuertes desde blanco, blanco grisáceo, gris, pardo claro, amarillo, naranja, rojo, granate hasta negro (óxidos de Fe (amarillo, pardo, anaranjado y rojo), óxidos de Mn (negro) y otros), lo cual, no es litocrómico, sino debido a las condiciones redoximórficas.

Los paquetes colorados son extremadamente duros y muy meteorizados ricos en aluminio y hierro y no tienen rasgos pedogenéticos pero entre ellos, al menos entre el PCI y PC2 se encontraron varios segmentos de paleosuelos con propiedades verticas. El PCI (base de la formación) tiene siete capas líticas, entre ellas una carbonosa (2PC). El límite superior es el paleosuelo Btss, a 61.5 m arriba, el paquete colorado dos (PC2) y, entre ambos (PCI-PC2) los cinco paleosuelos.

En esta formación, no se encuentran paleosuelos dentro de los paquetes colorados pero si, entre el PCI y PC2, en los cuales se hallaron cinco segmentos de paleosuelos de no más de 30 cm de espesor (Lithic Haplusterts). Los paleosuelos o segmentos de ellos son pardo rojizo oscuro (5YR3/3), color ocasionado por la presencia de óxidos de Fe pedogenético (goethita-hematita) liberados por deshidratación. Son bajos en carbonatos y sales.

De acuerdo con la condición climática planteada para la formación y aunque se da estacionalidad, abundan las precipitaciones y la condición de humedad. La formación de carbonatos pedogenéticos se ve limitada por el intenso lavado, del mismo modo, las sales. Los procesos pedogenéticos dominantes fueron: iluviación

y lixiviación de arcilla, mineralización de la MO, carbonatación, adensamiento y erosión hídrica. Su génesis indica que ellos, se habrían formado bajo un clima estacional, contrastado, bajo un régimen ústico (inviernos fríos y extremadamente húmedos).

La Venta (13.8-11.60 Ma) depositada después de las oscilaciones climáticas miocénicas, fue producida por ríos que dejaron enormes depósitos arenosos, limosos y gravillosos en amplias llanuras inundables y en abanicos. Algunos depósitos fueron enriquecidos por volcanoclastos andesíticos y dacíticos de un volcanismo maduro. En estos sedimentos predominan colores rosados en las formaciones San Alfonso y Mesitas, mientras el resto son grises esencialmente, excepto en la parte alta de la Formación Villavieja, donde existen tres paquetes líticos rojos: en el techo, Upper Red Bed; en el centro, Lower Red Bed y, en el piso, Arenas Ferruginosas.

El color rojo predominante en la Formación Villavieja es debido a la liberación de hierro a partir de los minerales primarios, por meteorización y/o pedogénesis, su difusión dentro de la matriz del suelo y posterior oxidación se propone como el mecanismo responsable del color dominante en las capas rojas del desierto de La Tatacoa. La Unidad Arenas Ferruginosas exhibe condiciones redoximórficas. Las capas rojas son altamente meteorizadas y presentan variabilidad espacial, especialmente en el espesor, en ellas no se evidencia ningún rasgo pedogenético, sin embargo, dentro de ellas existen paleosuelos ya sea como sequum o segmentos de ellos. Para esta formación, Flórez *et al.* (2018), reportan paleosuelos en el Upper Red Bed, dos segmentos y un sequum. En el Lower Red Bed, 11 segmentos y un sequum y, en las Arenas Ferruginosas, un sequum, (Sodic haplotorrerts). Estos autores resaltan la presencia de perfiles completos de paleosuelos, lo que indica la influencia de un mejoramiento en el clima que dio la posibilidad de desarrollar horizonización. Los suelos son rojos y exhiben en la base condiciones redoximórficas. Son altos en carbonatos y sodio, lo cual coincide con la estacionalidad climática reportada para La Venta (Formación Villavieja), el clima es muy contrastado con alternancia de las estacionalidades donde ocurre un periodo húmedo corto y otro seco muy dominante y de más larga duración.

Tanto la cantidad de precipitación como la estacionalidad, la temperatura y la evaporación afectan el secado del suelo que es el principal impulsor de la formación de carbonatos y otras sales pedogenéticas. Para su formación se requiere que se sequen los suelos y, por tanto, afloran las sales. Los procesos pedogenéticos dominantes y fuertemente desarrollados fueron: iluviación y lixiviación de arcilla, mineralización de la MO, solodización, rubefacción, fersialitización, carbonatación, adensamiento y erosión hídrica.

Tanto en La Borrega como en Villavieja, se formaron Vertisoles, los cuales reflejan bien las condiciones climáticas imperantes. En La Borrega, los paleosuelos aparecen como segmentos de no más de 30 cm de espesor, entre las capas líticas, sin desarrollo de un perfil completo o lo que se conoce como un sequum, tienen escasa evolución pedogenética y están altamente meteorizados. En la Formación Villavieja, se observan tanto segmentos como perfiles de paleosuelos dentro de las capas líticas. En ellos se evidencia horizoniza-

ción, así como evolución pedogenética y rasgos que muestran bien el desarrollo de las propiedades verticas.

En La Borrega, los climas fueron más húmedos, en Villavieja, más secos. A nivel de las capas líticas de tonalidades rojizas en La Borrega se produjo por una condición particular de mal drenaje, abundantes moteos que indican una condición exagerada de agua. En Villavieja predominó la rubefacción que dejó un color rojo en todas las capas líticas.

5. CONCLUSIONES

De todo el sedimentario Miocénico del Valle Superior del Magdalena, se resaltan los Grupos La Venta y La Arenosa.

En La Venta (13.8-11.6 Ma, pos oscilaciones), se resalta la Formación Villavieja por su riqueza fosilífera, litología, estructuras y los paleosuelos y dentro de ella la Unidad Arenas Ferruginosas. En todo el grupo la sedimentación fue producida por ríos aluviales y fluviales que dejaron enormes depósitos arenosos, limosos y gravillosos de colores rosados en base y techo, al interior, capas líticas grises y, en la parte media, limos rojos hasta naranja, duros y meteorizados. En la Formación Villavieja se encuentran paleosuelos o segmentos de ellos que han sido clasificados como Sodic Haplotorrerts, formados bajo un clima estacionalmente muy contrastado con inviernos fríos y húmedos y veranos muy cálidos y más secos, bajo un régimen tórrido. La rubefacción produjo el color rojo en todas las capas líticas.

En La Arenosa (contemporánea, al menos parcialmente, con MMCO-MMCT-Mi3b), sobresale la Formación La Borrega. En todo el grupo la sedimentación producida por enormes ríos caudalosos que dejaron depósitos arenosos y limosos grises. Dentro de la Formación La Borrega, ocurren cuatro paquetes colorados duros y meteorizados, que podrían ser coetáneos con el MMCO, mientras que en los limos y arenas que los separan, se encontraron cinco segmentos de paleosuelos, clasificados como Lithic Haplusterts, formados bajo un clima estacional, contrastado, inviernos fríos y extremadamente húmedos, bajo un régimen ústico. El color rojo de los paquetes colorados se produjo por la condición particular de mal drenaje (saturación prolongada o estacional, los abundantes moteos indican una condición exagerada de agua).

Tanto el Grupo La Venta como La Arenosa, tienen capas rojas altamente meteorizadas enriquecidas en carbonatos, sales, hierro y aluminio. No presentan evidencias de pedogénesis, pero, dentro de éstas, existen paleosuelos o segmentos de ellos también de color rojo (pardo, pardo amarillento, pardo rojizo hasta pardo rojizo oscuro). Dicho color rojo es debido a la liberación de hierro a partir de los minerales primarios, por meteorización y/o pedogénesis, su difusión dentro de la matriz del suelo y posterior oxidación se propone como el mecanismo responsable del color dominante en las capas rojas del desierto de La Tatacoa.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Luis Parra-Sánchez, quien planteó la idea de esta investigación, por su valioso apoyo, orientación, acompañamiento en el trabajo de campo/oficina y en la revisión del artículo final. Al Ingeniero Pablo León Flórez Molina-Constructora Los Ángeles DC, por proporcionar los permisos para los desplazamientos a La Tatacoa durante la primera fase de la pandemia y por su apoyo permanente. A mi Alma Mater, Universidad de Antioquia, a La Facultad de Ingeniería, al Grupo GAIA y, a las oficinas de Docencia y Jurídica, por la confianza y apoyo. A todos gracias!.

Referencias

- Birkeland, P. W. (1984). Soil and Geomorphology. Ed. Oxford University Press Inc; 2nd Revised edition edition (20 Dec. 1984) (Enero 1 de 1600).
- Cox, C. Barry & Moore, P.D. (1993). Biogeography. An ecological and evolutionary approach (5th ed.). Blackwell Scientific Publications, Cambridge.
- Emiliani, C. (1992). Planet Earth: Cosmology, Geology, and the Evolution of Life and Environment. Cambridge: Cambridge University Press.
- Flórez-Molina, M. T. (2018). Rocas-Paleosuelos-Arqueología, desierto de La Tatacoa, Huila Colombia. Ed. Académica Española. ISBN: 978-620-2-16275-3. 177p.
- Flórez-Molina, M. T., Parra-Sánchez, L. N., Jaramillo-Jaramillo, D. F. & Jaramillo-Mejía, J. M. (2013). Paleosuelos del mioceno en el desierto de la Tatacoa. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, 37(**143**), 229-244. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.6>.
- Flórez-Molina, M. T., Parra-Sánchez, L. N., Jaramillo-Jaramillo, D. F. & Jaramillo-Mejía, J. M. (2018). Evidencias macromorfológicas y micromorfológicas de paleosuelos en el desierto de La Tatacoa y su variación sincrónica. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 42 (**165**), 422-438.
- Flynn, J., Guerrero, J., and Swisher, C. (1997). Geochronology of the Honda group, in Vertebrate Paleontology in the Neotropics: the Miocene fauna of La Venta, Colombia. Editors R. Kay, C. Madden, R. L. Cifelli, and J. Flynn (Washington, DC: Smithsonian Institution Press), 44-60.
- Foster, G.L., Lear, C. H. & Rae, J. W. B. (2012). The evolution of pCO_2 , ice volume and climate during the middle Miocene. *Earth Planet Sci Lett*, 341-344, 243-254.
- 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.

- Herbert, T. D., Lawrence, K. T., Tzanova, A., Peterson, L. C., Caballero-Gill, R. & Kelly, C. S. (2016). Late Miocene global cooling and the rise of modern ecosystem. *Nature geoscience*. 9, 843-847.
- Honna T., Sadahiro Y., and Katsuhiko M. (1988). A Simple Procedure to Determine Melanic Index that is Useful for Differentiation Mgelanic from Fulvic Andisols (Facul toyf Agriculture, Tottori University). *Japanese Society of Pedology*. 69-78p.
- Methner, K., Campani, M., Fiebig, J., Löffler, N., Kempf, O. & Mulch, A. (2020). Middle Miocene long-term continental temperature change in and out of pace with marine climate records Crossref DOI. Link: <https://doi.org/10.1038/S41598-020-64743-5>, Published: 2020-12. En: <https://www.nature.com/srep/>, 10pp.
- Montes, C., Silva, C. A., Bayona, G. A., Villamil, R., Stiles, E., Rodriguez-Corcho, A. F., ... & von Quadt, A. (2021). A Middle to late Miocene trans-Andean portal: Geologic record in the Tatacoa Desert. *Frontiers in Earth Science*, 8, 643. doi: 10.3389/feart.2020.587022.
- Parra, L.N. (2018). Rocas-Paleosuelos-Arqueología, desierto de La Tatacoa, Huila Colombia. Ed. Académica Española. ISBN: 978-620-2-16275-3., 19-52.
- Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*. 107, 501-504.
- Peterson, J. (2018). Climate of the Miocene period. Obtenido de: sciencing.com.
- Quiroga, A., Funaro, D., Noellemeyer, E. & Peinemann, N. (2006). Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 90(1-2), 63-68.
- Sotelo, B. J. (2020). Micromorfología de paleosuelos del Desierto de La Tatacoa, Colombia: Interpretación paleoambiental del Mioceno Medio. Tesis Magister. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias. 156p. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79280>
- Soil Survey Staff (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. p. 338. En: <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSEDOCUMENTS/nrcs142p2.051546.pdf>
- Shoji, S., M. Nanzyo & R. Dahlgren. (1993). Volcanic ash soils. Genesis, properties and utilization, Elsevier, Science Publishers, B. V. Netherlands.
- Universidad Surcolombiana (USCO). (2006). Convenio Interadministrativo No 1071-200 de 2005, Gobernación del Huila-CAM-USCO.
- Van Wambeke, A. (1991). Soils of the Tropics: properties and appraisal, McGraw Hill, Inc., USA.
- Wilding, L.P., Smeck, N. E. & Hall, G. F. (1983). Pedogenesis and soil Taxonomy. 11. The Soil Orders, Elsevier Science Publishers B.V. Netherlands.
- Young, A. (1976). Tropical soils and soil survey, Cambridge University Press, Cambridge.