

Caracterización mineralógica y ambiental de sedimentos del Miembro Tequendama de la Formación Tilatá, en el Salto del Tequendama.

Mineralogical and environmental characterization of sediments from the Tequendama Member of the Tilatá Formation, in the Tequendama Falls.

Ferney Andrés Tangarife Escobar
Departamento de Geociencias
Universidad Nacional de Colombia
E-mail: fatangarifee@unal.edu.co

Sergio Gaviria Melo
Director Trabajo de grado, Doctor en Ciencias del
suelo – Geoquímica, Departamento de Geociencias
Universidad Nacional de Colombia.
sgaviriam@unal.edu.co

RESUMEN

Los sedimentos del Miembro Tequendama de la Formación Tilatá aflorantes en el Salto del Tequendama poseen el primer registro litológico después de una amplia discordancia entre el Paleoceno y el Mioceno. El estudio se realizó en dos secciones estratigráficas correlacionables entre sí, en las que se describieron las características geométricas, composicionales y las relaciones estratigráficas entre las capas. Se tomaron muestras de niveles representativos para su clasificación textural por granulometría en fase húmeda, cuyo tratamiento estadístico según las metodologías de Folk y Ward permitieron determinar la selección, cantidad de área fuente, promedio granulométrico, entre otros. Por medio de análisis por Difracción de rayos X se identificaron los minerales presentes, haciendo énfasis en la fracción arcilla para evaluar las fuentes de proveniencia de los sedimentos en distintos intervalos de tiempo. Los minerales arcillosos son indicadores de la historia de la evolución ambiental en esta zona de la Cordillera Oriental colombiana. Otras herramientas de análisis como Fluorescencia de rayos X, capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables, pH y pérdidas por calcinación ayudan a precisar la composición y las propiedades químicas de las arcillas y otros componentes como materiales orgánicos. Los resultados indican clases granulométricas que se relacionan directamente con cambios constantes en la energía de transporte. Restos de *Sacoglottis*, planta característica de ambiente tropical hallados en la base de la columna estratigráfica, demuestra que ocurrieron para este período condiciones ecosistémicas relacionadas con ríos de llanura de inundación. En complemento a la sedimentología, los análisis mineralógicos permitieron concluir que existieron dos tipos de áreas fuente para los sedimentos. Lo anterior se explica por la presencia de gravas de arenisca y clastos de carbón, cuarzo y anatasa, minerales de arcilla como la caolinita, interestratificados de illita-esmectita y algunos minerales pesados que permiten suponer que dichas fuentes corresponden a materiales provenientes del Grupo Guadalupe y la Formación Guaduas.

Palabras clave: Miembro Tequendama, Mioceno, Difracción de rayos X, granulometría, facies sedimentarias, proveniencia, minerales arcillosos.

ABSTRACT

The sediments from the Tequendama Member of the Tilatá Formation, outcropping in the Tequendama falls have the first record after a large lithologic unconformity between the Paleocene and the Miocene. The study was developed in two stratigraphic sections correlated each other, their geometrical, compositional and stratigraphic relationships between layers were described. And thus representative levels were sampled carefully to be classified by particle size on wet and treated statistically as Folk and Ward methodologies to define selection, number of source areas, average particle size, among other features. Furthermore characterized by X-ray diffraction identified the minerals present, emphasizing the clay fraction to assess the different sources of sediments in different time intervals. The clay minerals are indicators of environmental evolutionary history in this area of the Eastern Cordillera of Colombia. Other analysis tools such as X-ray fluorescence, cation exchange capacity, exchangeable bases, pH and calcination loss help to define the chemical composition and properties of clays and other components such as organic materials. The results indicate granulometric classes that relate directly to changes in the transportation energy. Remains of *Sacoglottis*, tropical plant found in the base of the stratigraphic column, shows that for this period occurred related ecosystem conditions of floodplain rivers. In addition to the sedimentology, mineralogical analyzes allowed to conclude that there were two types of source for sediment. This is explained by the presence gravel clasts of sandstone and coal, quartz and anatase, clay minerals such as kaolinite, illite- smectite interstratified and a low content of heavy minerals which suggest that these sources correspond to materials from the Guadalupe Group and Guaduas Formation.

Key words: Tequendama Member, Miocene, X-ray diffraction, grain size, sedimentary facies, provenance, clay minerals.

INTRODUCCIÓN

En la región del Salto del Tequendama afloran sedimentos del Miembro Tequendama de la Formación Tilatá, señalan una época anterior de lo que se conoce como la etapa final y más intensa del levantamiento de la Cordillera Oriental entre el Mioceno y el Plioceno hasta configurarse en su estado actual (Van der Hammen 1960, Helmens 1990; Helmens & Van der Hammen 1994; Van der Hammen et al 1973; Wijninga 1996). Se contrastan las condiciones

climáticas, la paleotopografía y la distribución de las zonas de aporte y las zonas de deposición de los sedimentos en comparación a las condiciones actuales. Diversos investigadores han interpretado las causas y efectos de la Orogenia Andina en la exhumación y evolución del paisaje y la litoestratigrafía de la Cordillera Oriental colombiana (Delgado et al 2011, Kathryn 1999, Mora et al 2010, Villamil 1999, Wessenlingh et al 2006). Sin embargo existe una ausencia en los estudios e investigaciones que conciernen al estricto análisis sedimentológico, químico y mineralógico de estos sedimentos. El presente trabajo caracteriza por medio de: Difracción de rayos X (DRX), Fluorescencia de rayos X (FRX), Capacidad de intercambio catiónico (CIC), bases intercambiables y granulometría, una parte del escaso registro litológico del Mioceno en la Sabana de Bogotá (Van der Hammen 1960). Adicionalmente se identifican algunos macrorrestos de plantas encontrados en niveles gravosos, lo que permite hacer una contextualización de la evolución de la flora en el Neógeno con referencia a los estudios detallados realizados en este campo por Wijninga (1996). Las características químicas y mineralógicas de las muestras en las columnas estratigráficas descritas, se ponen en relación con las condiciones ambientales, proveniencia y transporte de los sedimentos en el momento de su depósito. El estudio permite hacer una correlación estratigráfica con otras zonas para ayudar a entender la evolución geológica y ambiental de la Cordillera Oriental.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El área de estudio se encuentra ubicada dentro del llamado altiplano o Sabana de Bogotá en jurisdicción del municipio de Soacha sobre la vía que va de Bogotá al Colegio, en el margen derecho del Rio Bogotá, aproximadamente 500 metros antes del Salto del Tequendama (Figura 1, Foto 1 Anexo).

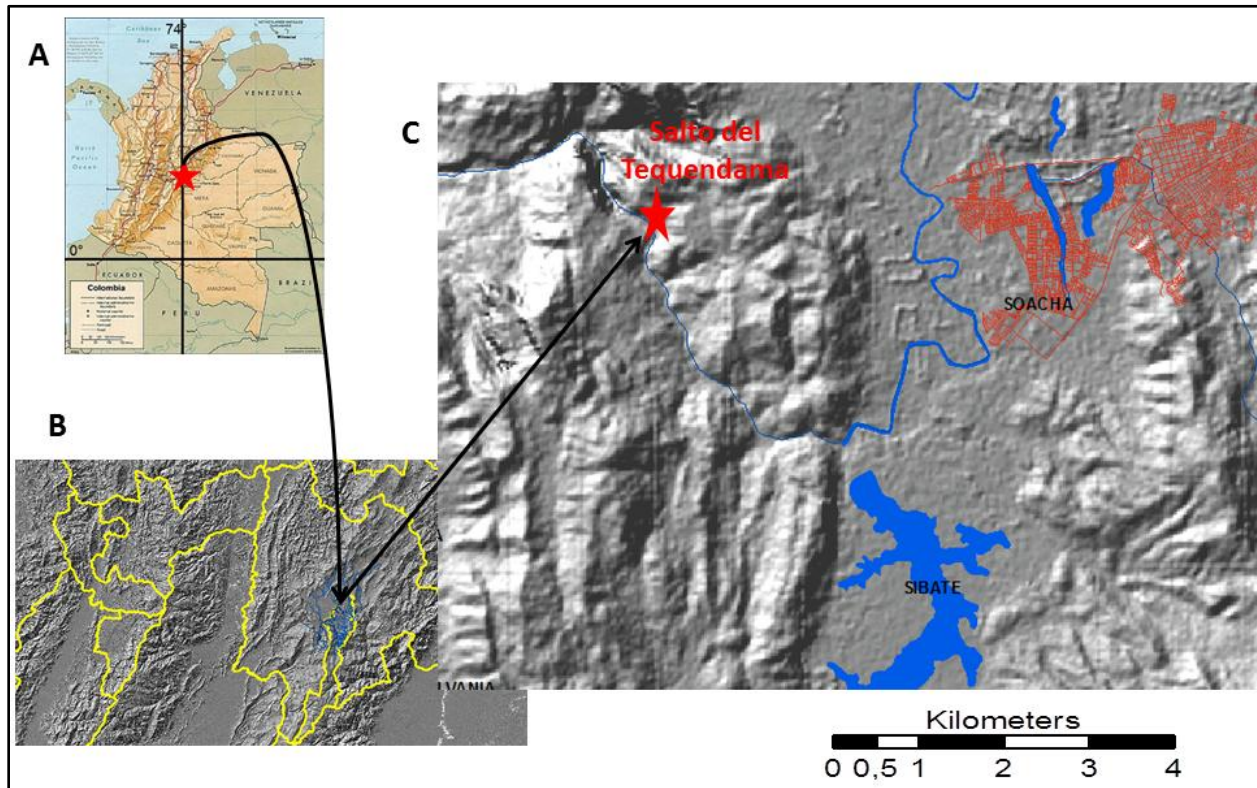


Figura 1: Ubicación del Miembro Tequendama en la zona de estudio. A. Dentro de Colombia B. Contexto departamental C. En la Sabana de Bogotá.

Figure 1: Location of Tequendama Member in the study area. A. Within Colombia B. Departamental context. C In The Sabana de Bogotá.

MARCO GEOLÓGICO

Litoestratigrafía

El Miembro Tequendama (Ttte) es la subdivisión más inferior de la Formación Tilatá que comprende los sedimentos fluviales cercanos al Salto del Tequendama (Van der Hammen et al. 1973; Helmens 1990). Está constituido por arenas parcialmente compactadas y gravas con intercalaciones locales de arcillas orgánicas y turbas-lignitas de color gris a marrón. El espesor máximo es de al menos 65 metros, los estratos pueden mostrar localmente una ligera deformación tectónica. El área tipo en el Salto del Tequendama muestra rasgos de terrazas en el lado noreste del Río Bogotá, remanentes del relleno sedimentario de dos pequeñas cuencas tectónicas. Basado en evidencias palinológicas se deduce que el ambiente de depositación del

Miembro Tequendama es tropical de tierras bajas en una zona drenada e inundada por un sistema fluvial a una altura menor a 700 msnm (Helmens & Van der Hammen 1995; Wijninga 1996, Wijninga et al 2003).

Bioestratigrafía y Cronoestratigrafía

La secuencia continental en el área de estudio no posee una sucesión fosilífera continua, sin embargo contiene sedimentos orgánicos que permiten una zonación bioestratigráfica. Debido a que no se puede establecer por ahora la base de un evento cronológico de importancia regional, se proponen unidades cronoestratigráficas de manera informal (Hooghiemstra & Van der Hammen 1995) que si permiten la correlación a nivel de Colombia. Hay una relación clara entre las unidades cronoestratigráficas y las Biozonas propuestas (Van der Hammen et al 1973), ya que un ecosistema predominante refleja un intervalo de tiempo con condiciones climáticas específicas y limitadas en techo y base.

Biozona I (Tropical de tierras bajas)

El Miembro Tequendama de la Formación Tilatá contiene polen y macrorestos netamente de afinidad tropical y algunos menos predominantes de bosque montano bajo con origen neotropical amplio y de familias con centro amazónico y andino como lo son: Humiriaceae, *Iriartea*, *Mauritia*, Melastomataceae, Cyclanthaceae, Bombacaceae, Parinari. (Van der Hammen et al. 1973; Wijninga 1996) (Figura 2).

Piso Tequendamense

Se propuso utilizar provisionalmente el nombre de Tequendamense a nivel de unidad cronoestratigráfica de Piso, el cual se caracteriza por la abundancia de polen de *Mauritia* (Tequendamense: 5.5 – 4.2 M.a.) (Hooghiemstra & Van der Hammen 1995). Posteriormente se

corrige esta afirmación (Wijninga 1996; Wijninga et al 2003) y se establece un límite superior para la Biozona I en Mioceno tardío (antes de 5.3 Ma) y el límite inferior indeterminado, lo que indirectamente modifica los límites del Tequendamense (Figura 2).

CHRONO-STRATIGRAPHY		LITHO-STRATIGRAPHY		BIOSTRATIGRAPHY		
				Biozones	Immigratory taxa	Paleoflora
TERTIARY	MIOCENE	Marichuela Formation	Lower Tiltatá F. Member Tequendama Member	I		tropical lowland
				II	<i>Hedyosmum</i> ↑	subandean/ tropical lowland
				III	<i>Myrica</i> ↑	upper subandean
				IV		Andean
				V		
QUATERNARY	PLEISTOCENE	Subachoque Formation	Rio Tunjuelito Formation Subachoque Member	VI	<i>Alnus</i> ↑	paramo / Andean
				VII	<i>Quercus</i> ↑	

Figura 2: Compilación de cronoestratigrafía, litoestratigrafía y bioestratigrafía para los sedimentos neógenos – cuaternarios de la Sabana de Bogotá. Tomado de Wijninga 1996 b

Figure 2: Compilation of chronostratigraphy, lithostratigraphy and biostratigraphy of the Neogene-Quaternary sediments of the Sabana de Bogotá. (From Wijninga 1996)

CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Es una técnica experimental que se basa en la radiación de rayos X sobre la estructura cristalina, que interactúan con los electrones que rodean los átomos y proveen información sobre la posición y tipo de átomo que encuentran en su camino. La λ de los rayos X se encuentran en el mismo rango que las distancias interatómicas: 0,1-100 Å. Esta interacción puede ser descrita por la ley de Bragg: $n\lambda = 2d \sin\theta$, siendo λ la longitud de onda de los rayos x, θ el ángulo de incidencia, d la distancia entre planos adyacentes y n un número entero que indica el número de planos atravesado por el haz. Los minerales arcillosos son identificados en agregados orientados que mejoran las reflexiones de los planos $00l$, este carácter es manifestado en la posición de los picos, intensidad, forma y amplitud (Moore & Reynolds 1997).

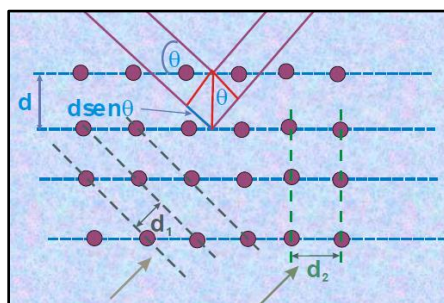


Figura 3. Ángulo donde se da la difracción de acuerdo con la estructura del cristal. (Tomado de Ozols 2009)

Figure 3. Angle where occur diffraction, according with the crystal structure. (From Ozols 2009)

ESTRUCTURA DE LAS ARCILLAS

Las arcillas son importantes fases mineralógicas que indican los procesos a los cuales ha sido sometido el material durante la exposición, el grado y tipo de meteorización, las condiciones del medio de depósito de los sedimentos y las transformaciones termodinámicas resultantes del enterramiento por diagénesis y metamorfismo.

Los minerales de arcilla se clasifican dentro de los filosilicatos, y están constituidos por láminas de Si^{4+} en coordinación tetraédrica (T) con oxígenos y láminas de Al^{3+} en coordinación octaédrica(O) (Figura 3), unidas entre sí con oxígenos comunes o grupos OH.

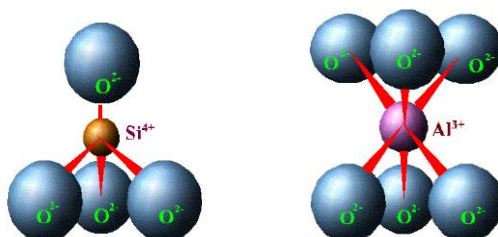


Figura 4. Organización estructural en coordinación tetraédrica (T) y coordinación octaédrica(O) respectivamente.

Figure 4. Structural organization in tetrahedral coordination (T) and octahedral coordination (O) respectively.

El Si^{4+} puede ser reemplazado por Al^{3+} en posición tetraédrica y el Al^{3+} por Mg^{2+} o Fe^{2+} en posición octaédrica. Estas sustituciones isomórficas de cationes estructurales crean déficit de carga positiva que son compensadas por la introducción de cationes interlaminares. La distribución de las láminas T y O, además de los distintos cationes en la estructura atómica, dan origen a diferentes tipos de minerales de arcilla, de tipo 1:1 (T – O) o de tipo 2:1 (T – O – T).

Familia de la Caolinita: Está integrada por minerales arcillosos de estructura 1:1 y el espaciado base de la lámina es de aproximadamente 7Å.

Familia de las Illitas: Comprende minerales arcillosos tipo mica: muscovita, biotita o flogopita, con una estructura 2:1, que presentan un espaciado interlaminar cercano a 9Å con un ión adicional de K^+ que lo aumenta a 10 Å.

Familia de la Esmectita: Grupo de minerales arcillosos que poseen estructuras dioctaédricas y trioctaédricas, con arreglo 2:1, con distintas sustituciones catiónicas que generan déficit de carga que es reemplazada por cationes hidratados. Su espaciado laminar es de 14-15Å (Thorez 1976).

Minerales arcillosos inter-estratificados: Minerales arcillosos de capa mezclada en los cuales alternan diferentes especies arcillosas en distribución regular o irregular. Incluyen por ejemplo la illito- esmectita (rectorita o rechwite), illito- vermiculita e illito- clorita (corrensita).

METODOLOGÍA

En trabajo de campo se describieron dos secciones estratigráficas mediante el método del bastón de Jacob, distanciadas horizontalmente entre ellas por unos 300 metros. A medida que se avanzaba estratigráficamente se tomaron 15 y 6 muestras representativas de sedimentos para las secciones 1 y 2, las que posteriormente se sometieron a descripción detallada y análisis de laboratorio en las secciones de Química de suelos y Física de Suelos del Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC y en el laboratorio del CEIF de la Universidad Nacional de Colombia (Tabla 1. Anexo).

- **Descripción de muestras con microscopio binocular:** Se realizó una descripción de las características físicas, geométricas, composicionales y texturales con microscopio de 20X, 40X y 50X para cada una de las muestras según la tabla de colores Munsell, la escala de tamaño de grano propuesta por Wentworth (1922), y la clasificación textural para rocas sedimentarias propuesta por Folk (1954).
- **Granulometría en fase húmeda:** Análisis de tamaño de partícula en fase húmeda por el método de la pipeta a 16 muestras, separación de las fracciones granulométricas más gruesas por medio de tamices y las más finas por la velocidad de caída en el agua, siguiendo la Ley de Stokes (IGAC 2012).
- **DRX:** Se cualifica el contenido de minerales mediante la identificación de la mineralogía total en la muestra pulverizada y tamizada a 60 mesh en agregado no orientado y se

identifican las familias de minerales arcillosos en lámina orientada de la fracción menor a $2\mu\text{m}$ en natural (N), con solvatación en vapores de Etilen Glicol (EG) y calentada a 550°C (IGAC, 1995). Se analizaron 18 muestras para mineralogía total en el IGAC y se seleccionaron 7 muestras de interés para difractarlas en laboratorio de DRX del CEIF.

- **FRX:** Análisis químico cuantitativo con énfasis en elementos mayores, en el laboratorio del CEIF. Las muestras fueron preparadas en perla, con Metaborato y tetraborato de Litio como fundente.
- **CIC y bases intercambiables:** se define como la capacidad del suelo para adsorber cationes fácilmente intercambiables. Se le puede considerar equivalente a la carga (-) del suelo. Se expresa en equivalentes por unidad de masa ($\text{meq}/100\text{ g}$ de suelo) o (mmol/Kg de suelo), esta propiedad está en función del contenido y tipo de arcillas y del contenido de materia orgánica en la muestra. Los cationes más comunes encontrados en este tipo de análisis son Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ . El método usado para la obtención de esta propiedad se tomó de IGAC 1989.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estratigrafía

En la sección estratigráfica 1 (Figura 5) se presentan las muestras, clasificación granulométrica (Tabla 2, anexo), color y clasificación de facies (Miall 1978) (Figura 1, anexo). La secuencia inicia con un nivel arcilloso en la base, en contacto discordante sobre la Formación Guaduas, encima del cual se presentan algunas capas de gravas con intraclastos de carbón y macro-restos de plantas, seguido por intercalaciones de lodo, lodo arenoso y arena lodosa, algunos de estos niveles poseen madera fosilizada y raíces (Foto 2, anexo).

La sección 2 (Figura 2, anexo) muestra a la base un depósito de gravas (Foto 3, anexo) y es suprayacido por capas de arenas y gravas granodecrecientes con contenido de macro-restos, hacia el metro 8 se presenta un nivel lodoso café.

Los contactos son predominantemente netos y erosivos a excepción de la base, los granos de arena son translucidos de tamaño fino a muy fino, subredondeados a redondeados e inequigranulares.

Las dos secciones muestran a la base litologías claramente distintas, aun así son correlacionables mediante un nivel gravoso que contiene macro-restos de familia Humiriaceae, género *Sacoglottis* (Foto 4, Anexo), un taxa de flora actualmente situado en la amazonia (Wijninga 1996).

Facies sedimentarias

Las características faciales para cada muestra se determinaron por la descripción en afloramiento, en muestra de mano y clasificación granulométrica, y se tuvieron en cuenta las estructuras sedimentarias y las relaciones entre las capas para clasificarlas. Así se encontraron las siguientes: **Fcf** (Depósitos de pantano y estanque), **Fsc** (depósito de pantano trasero), **Fl** (desbordamiento o disminución de inundación), **Fm** (depósito de desborde), **P** (paleosuelo), **Se** (relleno de canales menores), **Gms** (flujo de derrubios) y **Sp** (barras transversales y ondas).

Figura 5. Sección estratigráfica 1 con litología, ubicación de las muestras, clasificación granulométrica, color y clasificación facial.

Figure 5. Stratigraphic section 1 with lithology, sample locations, granulometric classification, color and facial classification.

Granulometría

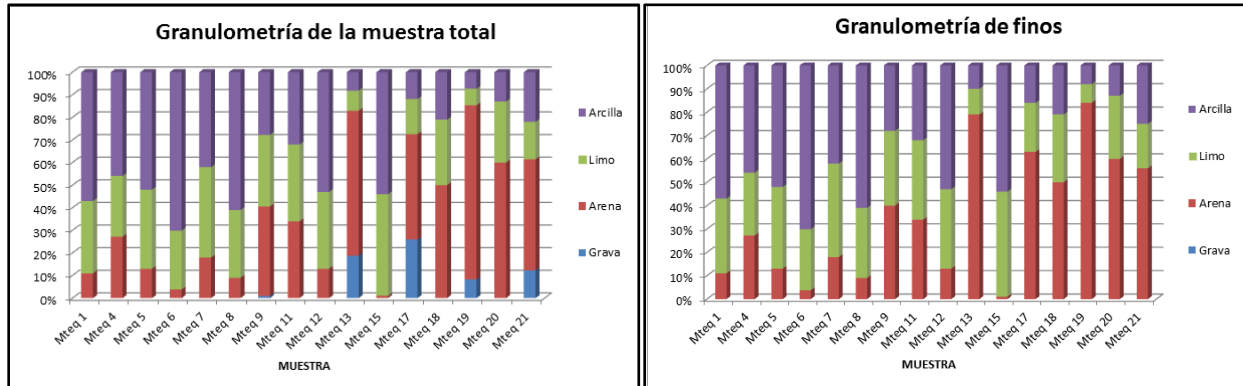


Figura 6. Granulometría en porcentaje en fase húmeda de la muestra total y de la tierra fina (<2mm).

Figure 6. Particle size in percent, in the wet phase of the total sample and fine particle (<2mm).

En la granulometría predominan fracciones arena hacia la base cambiando gradualmente hasta fracción arcilla en las muestras de la parte superior de la columna (Figura 6). Aparecen esporádicas sucesiones de gravas arenosas, lo que indica un incremento en el régimen de energía en el caudal causado por aumento de la pendiente o de la precipitación meteórica en distintos momentos del depósito de los sedimentos. En el análisis granulométrico se hallaron las siguientes clases: Arcilloso (Ar), Franco arcilloso (F Ar), Franco arenoso (F A), Arcillo limoso (Ar L), Franco (F), Arenoso franco (A F) y Franco arcilloso arenoso (F Ar A). Se realizó un tratamiento estadístico para cada una de las muestras (Tabla 3, anexo) en el que se graficaron la frecuencia, la frecuencia acumulada y la tendencia polinómica, así como medidas de tendencia central y de dispersión como: media, moda, mediana, curtosis (agudeza), asimetría y desviación estándar. Todo esto según las metodologías y fórmulas planteadas por Folk & Ward (1957) y

Folk (1974) (Figura 2, anexo), con el fin de entender de manera cuantificable aspectos como: tipo de transporte, selección, simetría de la selección, predominio de tamaño, número de áreas fuente, medio de transporte, etc. Hacia la base de ambas secciones se tienen distribuciones granulométricas heterogéneas y dispersas, mientras que hacia el tope, las distribuciones son más homogéneas y la selección se hace mayor.

Difracción de rayos X

En la Figura 7 se presentan los difractogramas de la mineralogía total para todas las muestras en polvo no orientado. Los minerales que predominan son: cuarzo con picos en 4,24 y 3,33 Å, anatasa que se identifica con la señal a 3,50 Å (101), caolinita identificada por los planos 001 (7,1 Å) y 002 (3,56 Å), interestratificados en forma de banda ancha entre 10 y 14 Å del plano 002, y el pico de 4,46 Å característico del plano común 020 a varios minerales de arcilla. La Illita con planos 001 (10 Å) y 002 (5 Å) se presenta en abundancia en la muestra Mteq 15. Todas las muestras contienen cuarzo como mineral predominante.

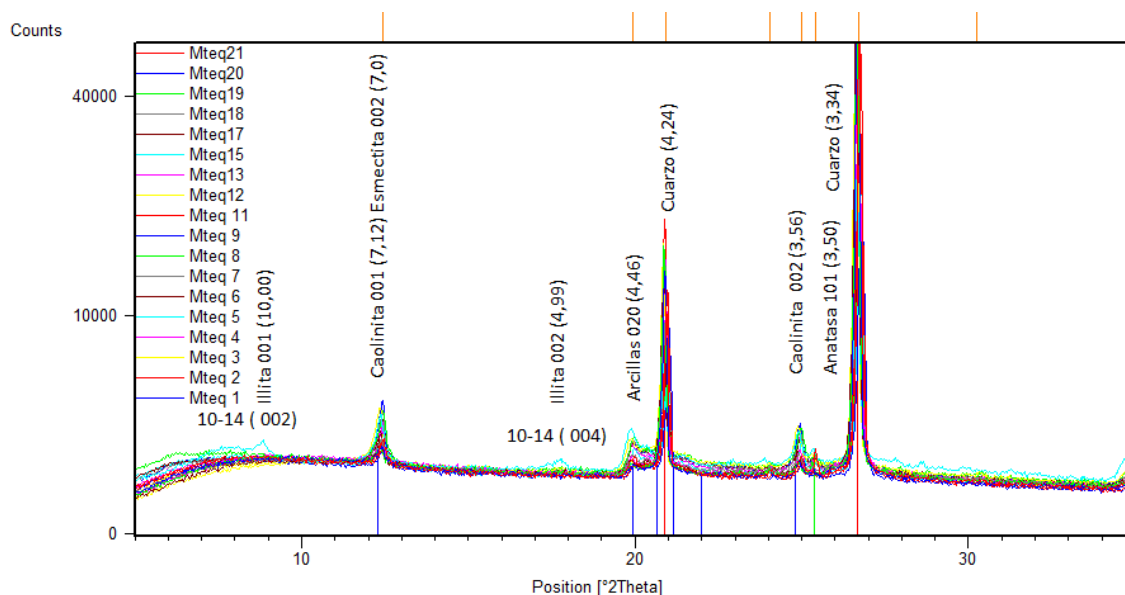


Figura 7. Difractogramas comparativos en agregado no orientado.
Figure 7. Comparative diffractograms in random powder.

En la Figura 8 se muestran los difractogramas de la fracción arcilla orientada en el plano $00l$, para las 7 muestras de mayor interés. Se puede observar una banda de intensidad variable desde los $10 \text{ \AA}$ hasta $14 \text{ \AA}$, que pertenece a minerales arcillosos interestratificados en su plano 002 junto con Illita 001 que está enmascarada a $10 \text{ \AA}$. La caolinita aparece con picos intensos y agudos en $7,12$ y $3,56 \text{ \AA}$. Además se reconocen los picos de cuarzo, con menor intensidad relativa que en la muestra total. Los interestratificados presentan bandas centradas entre 5 y $6 \text{ \AA}$, planos 004 que se superponen al plano 002 de illita.

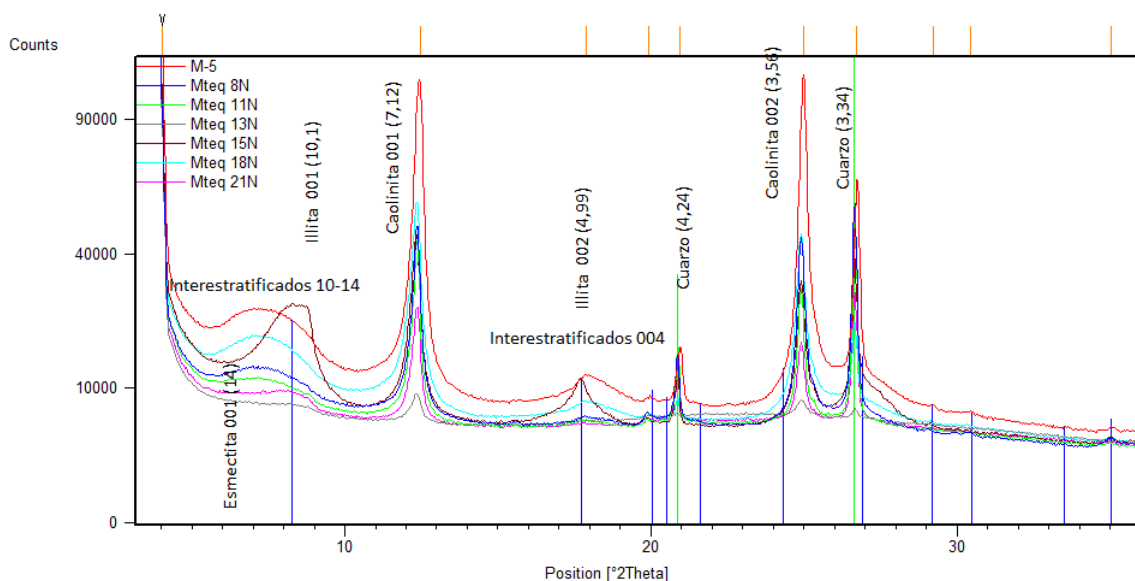


Figura 8. Difractogramas comparativos de la fracción arcilla orientada.
Figure 8. Comparative diffractograms of the oriented clay fraction.

En la figura 9 se presentan los difractogramas en natural, EG y calentadas a 550° para la muestra Mteq 15, la más representativa de las 7 seleccionadas. Se identifica cuarzo y caolinita por los picos característicos en natural y etilenglicol. Cuando se calienta, la caolinita se destruye y los picos desaparecen dejando en evidencia un pequeño pico a $3.50 \text{ \AA}$ que pertenece a la anatasa.

Los minerales arcillosos interestratificados se reconocen muy bien por la banda localizada entre 10 y 12 Å que con etilenglicol expande hacia ángulos más bajos, con centro en 12.5 Å. Cuando la muestra es calentada a 550°C, la estructura colapsa a 10 Å. La expansión y colapso de la estructura permite clasificar este mineral como illito-esmectita. Adicionalmente se identifica illita abierta como una banda ancha en DRX natural alrededor de 10 Å que para esta muestra es un componente menor. Una banda superpuesta a la anterior pero centrada entre 9 y 10 Å que se distingue cuando la fracción esmectítica de la estructura expande a 12.5 Å, corresponde al plano 003 del interestratificado cuya posición permite reconocer que en la estructura predominan las capas illíticas sobre las esmectíticas (Moore y Reynolds 1997). En general todas las muestras poseen el mismo tipo de minerales.

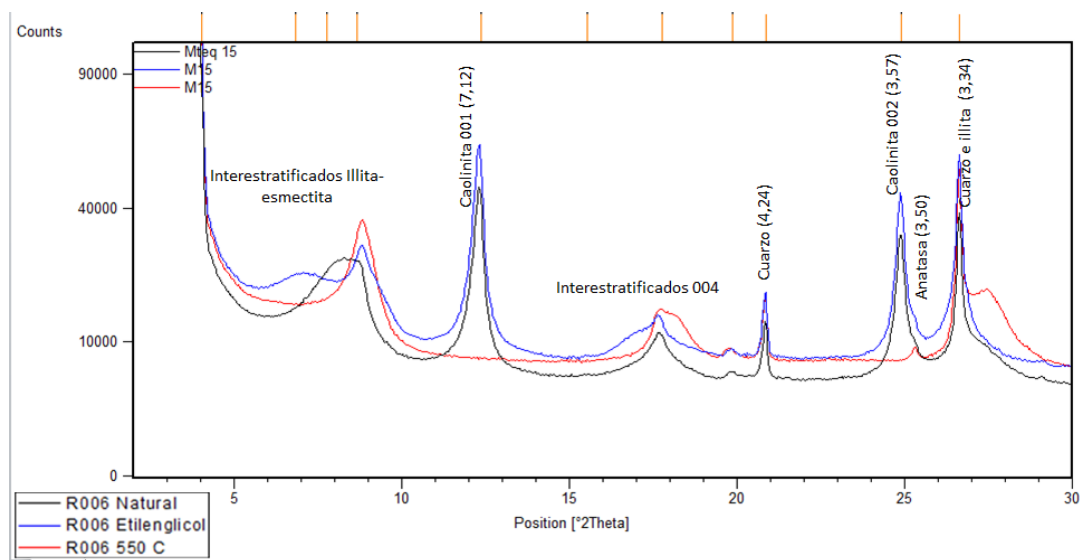


Figura 9. Difractogramas comparativos en la muestra Mteq 18 en fracción menor a 2 µm (en natural), Etilenglicol (EG) y 550°C..

Figure 9. Comparative diffractograms of the Mteq 18, oriented clay fraction, EG and 550°C.

FRX

En la tabla 1 se observan los resultados de la composición química por FRX para las muestras totales; las muestras con porcentajes de Al_2O_3 mayores (13 a 19 %) corresponden a los materiales con granulometría más arcillosa, en los que predomina la caolinita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Contrastan con los contenidos altos de SiO_2 en las muestras más arenosas (mayor de 90 %), y con proporciones bajas de los otros elementos. El potasio de la muestra 15 evidencia el alto contenido de Illita determinada en DRX. Minerales pesados se ponen en evidencia con el contenido de elementos menores como Ti y Zr. La pérdida por calcinación a $1000^\circ C$ indica el alto contenido de volátiles en algunas muestras, en este caso representa un valor alto de materia orgánica en las muestras más arcillosas, según la granulometría. Además, una parte de las pérdidas son aguas de composición de los minerales arcillosos

Elemento y/o compuesto	M-5 TEQ	M-8 TEQ	M-13 TEQ	M-15 TEQ	M-21 TEQ
SiO ₂	79.29%	66.44%	93.69%	68.01%	92.06%
Al ₂ O ₃	13.46%	17.87%	4.61%	19.74%	5.55%
TiO ₂	0.82%	0.83%	0.29%	1.00%	0.35%
Fe ₂ O ₃	0.68%	0.79%	0.31%	1.44%	0.33%
K ₂ O	0.62%	0.76%	0.33%	2.32%	0.37%
MgO	0.21%	0.29%	0.05%	0.65%	0.11%
P ₂ O ₅	0.16%	0.23%	0.06%	0.12%	0.17%
CaO	0.15%	0.25%	0.07%	0.31%	0.09%
Na ₂ O	0.06%	0.07%	0.03%	0.17%	0.04%
Zr	539 ppm	361 ppm	47 ppm	222 ppm	663 ppm
Sr	144 ppm	192 ppm	49 ppm	204 ppm	81 ppm
Ba	139 ppm	240 ppm	39 ppm	182 ppm	193 ppm
S	123 ppm	462 ppm	277 ppm	635 ppm	142 ppm
Cr	71 ppm	116 ppm	25 ppm	79 ppm	52 ppm
Zn	57 ppm	57 ppm	39 ppm	682 ppm	24 ppm
Rb	37 ppm	50 ppm		116 ppm	15 ppm
Pb	26 ppm	27 ppm	10 ppm	18 ppm	13 ppm
Ni	23 ppm	27 ppm	32 ppm	68 ppm	13 ppm
Pérdida por calcinación	5.80%	18.20%	2.90%	10.10%	2.60%

Tabla 1: resultados del análisis de FRX en compuestos y elementos, y proporción de pérdida por calcinación.

Table 1: FRX analysis in compounds and elements, and calcination loss measurement.

Capacidad de Intercambio catiónico y Bases intercambiables

Indican la facilidad que tienen los minerales de arcilla para movilizar cationes libres, según su disponibilidad en el medio. En este caso, los pH ácidos indican poco contenido en estos cationes en el complejo de cambio, lo que implica lavado por el paso del agua en el tiempo. El catión Ca^{2+} se conserva asociado a las interláminas del interstratificado esmectítico. Los mayores valores de CIC de las muestras 8 y 15 se deben al alto contenido de materia orgánica y arcillas interstratificadas esmectíticas. Por el contrario, en muestras de granulometría arenosa donde predomina el mineral arcilloso caolinita, la CIC y los cationes intercambiables es muy bajo.

Muestra	pH	CIC meq/100g	Ca 2+ meq/100g	Na + meq/100g	Mg2+ meq/100g	K+ meq/100g
MTeq 5	4,70	6,4413	2.4919	0.0977	0.7199	0.2650
MTeq 8	4,10	28.4601	4.2642	0.0704	0.6786	0.2357
MTeq 11	4,63	2.2428	1.7535	-0.0066	0.2933	0.0681
MTeq 13	3,74	2.4188	0.5090	0.0013	0.0626	0.0881
MTeq 15	5,84	11.7762	40.191 (?)	0.8115	1.6712	0.4225
MTeq 18	3,87	2.7932	0.4894	0.0615	0.0758	0.0922
MTeq 21	4,28	2.7541	0.4894	0.0013	0.1187	0.1243

Tabla 2: CIC y bases intercambiables.

Table 2: CIC and interchangeable base.

CONCLUSIONES

- El Miembro Tequendama de la Formación Tilatá se formó en un ambiente de depósito de ríos de llanura, con episodios de inundación periódicos, lo que se explica por la alternancia entre características faciales de pantanos y desbordamiento con barras transversales y relleno de canales.
- Los macro-restos de Humiriáceae (*Sacoglottis*), proponen vegetación arbórea circundante, que pertenecía al bosque tropical de tierras bajas.

- La continuidad horizontal de las capas no es constante debido al ambiente dinámico de depósito (migración del cauce del río) aun así las secciones 1 y 2 se pueden correlacionar con litología y bioestratigrafía.
- La distribución bimodal y polimodal de los promedios de grano en las muestras ubicadas hacia la base del Miembro Tequendama indican un aumento de energía en el régimen de descarga y la variedad de áreas de aporte.
- El análisis granulométrico indica aumento en arenas y gravas hacia la base e incremento en el contenido de limos y arcillas hacia el tope.
- Los minerales arcillosos identificados por DRX son caolinitas, interestratificados illito-esmectíticos 10-14 y en menor cantidad Illitas abiertas.
- La presencia dominante de cuarzo en la mineralogía total y de caolinita en la fracción menor a 2 μm en la mayoría de los niveles indica una alta meteorización y retrabajamiento de los sedimentos a través de la historia en el área fuente y/o posterior al depósito. Los interestratificados illito-esmectíticos son heredados del área fuente por efecto de procesos diagenéticos (Bonilla et al 2011).
- Los valores de CIC (bajos) sugieren predominancia de Caolinita, con excepción de la muestra Mteq 8 y 15 donde se puede interpretar como alto contenido de materia orgánica asociada a arcillas interestratificadas.
- Los materiales heredados en los sedimentos del Miembro Tequendama pertenecían probablemente a fuentes de la Formación Guaduas y del Grupo Guadalupe, lo cual está

evidenciado por: intraclastos de carbón e interestratificados illito -esmectíticos (Bonilla 2008), en Guaduas, y líticos de cuarzoarenitas dentro de las gravas que se manifiesta por la abundancia de cuarzo en todas las fracciones granulométricas (Guadalupe).

- Los minerales pesados en pequeña proporción (anatasa, rutilo, titanita, zircón) son heredados principalmente del Grupo Guadalupe (Pérez y Salazar 1973).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es un homenaje al profesor Thomas Van der Hammen, quien inspiró una perspectiva simbiótica y naturalista en las ciencias de la tierra en Colombia.

Agradezco al Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC, a su director Jorge Alberto Sánchez: Ing. Karen Orduz en la granulometría, Antonio Patiño en la DRX, Ing. Fernando Lancheros en la CIC, Ing. Jaime Álvarez, Ing. Roberto Rodríguez en la identificación de macrorrestos. Al laboratorio de DRX y FRX del CEIF, Universidad Nacional de Colombia. A la geóloga Jennifer Ángel Amaya y al geólogo Julio Fierro Morales por su ayuda en el trabajo de campo. Al geólogo Héctor Javier Buitrago por la colaboración en la estratigrafía de campo y sus agradables disertaciones. Muy especialmente a los Geólogos Manuel Fernando Sánchez y José Alejandro Franco y a mi compañera Angélica Sotelo. A mi amigo y consejero, profesor Sergio Gaviria Melo, del departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia. A la estudiante de topografía Mónica Parada por la digitalización de las columnas estratigráficas, y por ser el centro de mi corazón, al amor y a mi familia.

REFERENCIAS

BONILLA, G., SARMIENTO, G, GAVIRIA, S. (2011): Proveniencia y transformación diagenética de minerales arcillosos Del Maastrichtiano - Paleoceno al norte de Bogotá, Cordillera Oriental de Colombia, Edición especial de Geología Colombiana para el XIV Congreso Latinoamericano de Geología, 36 No. 1, pp. 179-196

DELGADO, A., MORA, A., & REYES-HARKER, A., (2011), Deformation partitioning in the Llanos foreland basin during the Cenozoic and its correlation with mountain building in the hinterland, in: Journal of South American Earth Sciences xxx, Bucaramanga.

FOLK, R.L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rocks. Journal of Geology, 62, 344-359.

FOLK, R. & WARD, W., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Petrology 27(1): 3-26.

FOLK, R.L., 1974. Petrology of sedimentary rocks, Hemphill publishing company, Austin Texas.

HELMENS, K., (1990): Neogene-Quaternary Geology of the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia (Stratigraphy, Paleoenvironments and Landscape Evolution) (Trabajo de Grado) 200 p, University Of Amsterdam, Berlin.

HELMENS, K. & VAN DER HAMMEN, T. (1994): The Pliocene-Quaternary of the high plain of Bogotá (Colombia): a history of tectonic uplift, basin development and climatic change, Quaternary International 21, p. 41-61.

HELMENS, K. & VAN DER HAMMEN, T. (1995), Memoria explicativa para los mapas del Neógeno-Cuaternario de la Sabana de Bogotá- Cuenca Alta del Rio Bogotá (Cordillera oriental de Colombia), Análisis Geográficos No. 24, IGAC, p. 91-142, Bogotá.

HOOGHIEMSTRA, H. (1995): Los últimos tres millones de años en la Sabana de Bogotá: registro continuo de los cambios de vegetación y clima. Análisis Geográficos No 24, p. 33-50 IGAC, Bogotá.

IGAC (1989): El análisis de suelos, plantas y aguas para riego, Documento externo, Laboratorio nacional de Suelos, Manual de asistencia técnica No 47, Bogotá.

IGAC (1995): Manual de procedimientos para análisis mineralógicos, Subdirección de Agrología.

IGAC (2012): Determinación de la distribución de partículas por tamaño – textura del suelo-, método de la pipeta, Grupo interno de trabajo, Laboratorio Nacional de Suelos Subdirección de Agrología.

KATHRYN, M. (1999): Uplift history of the Central and Northern Andes: A review, Columbia University, Palisades, New York.

- MIALL, A.** (1978): Fluvial sedimentology: Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5, 859 p.
- MOORE, D. & REYNOLDS, R.** (1997): X-Ray Diffraction and The Identification and Analysis of Clay Minerals, 378 p, Oxford University Press, New York.
- MORA, A., HORTON, B., MESA, J., KETCHAM, R., PARRA, M., BLANCO, V., GARCIA, D., STOCKLI, D.,** (2010), Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems, Colombia.
- OZOLS, A.** (2009): Difracción de rayos X, física del estado sólido, Universidad de Buenos Aires.
- PEREZ, G. & SALAZAR, A.** (1973), Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe, Bogotá
- THOREZ, J.** (1976): Practical identification of clay minerals: a handbook for teachers and students in clay mineralogy. 90 p., Editions G.LELLOTTE, Dison, Belgique.
- VAN DER HAMMEN, T., WERNER, J.H., VAN DOMMELEN, H.** (1973), Palynological record of the upheaval of the northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its high Andean biota. Review of Palaeobotany and Palynology, 16: 1-122.
- VAN DER HAMMEN, T.,** (1960), Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano continentales y Tectogénesis de los Andes colombianos, Informe Interno no. 1279, Servicio Geológico Nacional, Bogotá.
- VILLAMIL, T.** (1999): Campanian – Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela, Elsevier Science, p. 240-275, Houston.
- WENTWORTH, C.K.** (1922): A scale of grade and class terms for clastic sediments, Journal of Geology 27: 377-392.
- WESSENLINGH, F., GUERRERO, J., RASANEN, L., ROMERO, P., & VONHOF, H.** (2006), Landscape evolution and depositional processes in the Miocene Amazonian Pebas lake/wetland system: evidence from exploratory boreholes in northeastern Peru, Scripta Geologica, 133: 323-361, Leiden.
- WIJNINGA, V., HOOGHIEEMSTRA, H. & VAN DER HAMMEN, T.,** (2003): Evolución neógena de la flora Norandina con base en el registro palinológico-paleobotánico de la Sabana de Bogotá, Análisis geográfico No. 26, IGAC, Bogotá.
- WIJNINGA, V.** (1996): Neogene ecology of the Salto de Tequendama site (2475 m altitude, Cordillera Oriental, Colombia)" the paleobotanical record of montane and lowland forests, Review of Palaeobotany and Palynology, p. 97-156, Amsterdam.

ANEXOS

FOTOS

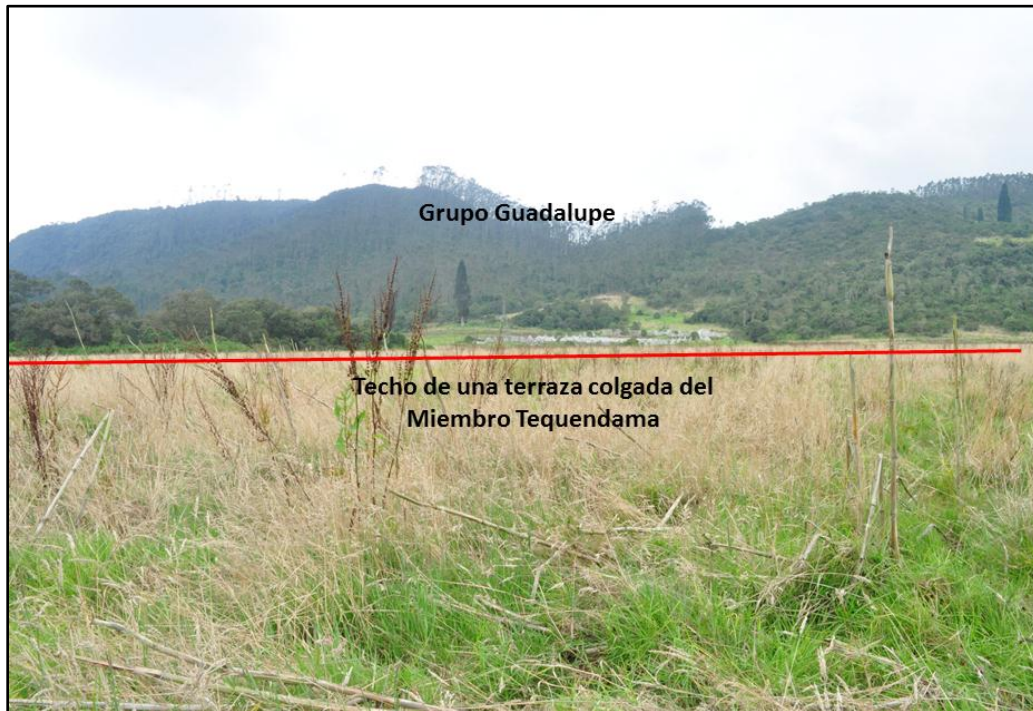


Foto 1: Variedad de litologías en la margen derecha del Río Bogotá. La terraza corresponde al Miembro Tequendama.



Foto 2: lodolita arcillosa con madera fosilizada o carbonizada, raíces en su estructura. Perteneciente a la Mteq 8.



Foto 3: Contacto discordante entre areniscas de la Formación Guaduas y gravas del Miembro Tequendama.



Foto 4: Macrorrestos encontrados en los niveles gravosos. Humiriaceae, género *Sacoglottis*.

TABLAS

En la siguiente tabla se resume el tipo, origen y análisis al que fue sometida cada una de las muestras tomadas de campo.

Muestra	Tipo	Sección	Análisis
MTeq 1	Sedimento	1	DRX – Granulometría
MTeq 2	Sedimento	1	DRX
MTeq 3	Sedimento	1	DRX
MTeq 4	Sedimento	1	DRX – Granulometría
MTeq 5	Sedimento	1	DRX – Granulometría – CIC – Ph – FRX- B I*
MTeq 6	Sedimento	1	DRX – Granulometría
MTeq 7	Sedimento	1	DRX - Granulometría
MTeq 8	Sedimento	1	DRX – Granulometría – CIC – Ph – FRX- B I
MTeq 9	Sedimento	1	DRX - Granulometría
MTeq 11	Sedimento	1	DRX – Granulometría – CIC – Ph – FRX- B I
MTeq 12	Sedimento	1	DRX – Granulometría
MTeq 13	Sedimento	1	DRX – Granulometría – CIC – Ph – FRX- B I
MTeq 14	Macroresto	1	Consulta bibliográfica
MTeq 15	Sedimento	1	DRX – Granulometría – CIC – Ph – FRX- B I
MTeq 17	Sedimento	2	DRX – Granulometría
MTeq 18	Sedimento	2	DRX – Granulometría – CIC – Ph – FRX- B I
MTeq 19	Sedimento	2	DRX – Granulometría
MTeq 20	Sedimento	2	DRX – Granulometría
MTeq 21	Sedimento	2	DRX – Granulometría – CIC – Ph – FRX- B I

+ Bases intercambiables.

Tabla 1: resumen de análisis y procedencia para cada muestra.

PLANEACIÓN - DESARROLLO ORGANIZACIONAL

Tabla 2: clasificación granulométrica. Laboratorio de suelos IGAC.

Muestra	Media	Distribución modal	Mediana	Curtosis	Selección – dispersión	Asimetría
MTeq 1	Limo	Unimodal (arcilla)	Arena fina	Muy leptocúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 4	Arena muy fina	Unimodal (arcilla)	Arena fina	Mesocúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 5	Limo	Unimodal (arcilla)	Arena fina	Muy leptocúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 6	Arcilla	Unimodal (Arcilla)	Arena fina	Muy leptocúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 7	Limo	Bimodal (Arcilla – Limo)	Limo	Leptocúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 8	Arcilla	Unimodal (Arcilla)	Arena fina	Muy leptocúrtica	Extremadamente pobre	Asimétrica hacia los

					seleccionado	más finos
MTeq 9	Arena muy fina	Unimodal (Limo)	Arena fina	Platicúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 11	Arena muy fina	Unimodal (Limo)	Limo	Platicúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 12	Arcilla	Unimodal (Arcilla)	Arena fina	Muy leptocúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 13	Arena fina	Bimodal (Grava y arena media)	Arena fina	Muy platicúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los gruesos
MTeq 15	Arcilla	Unimodal (Arcilla)	Arena fina	Muy leptocúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 17	Arena fina	Bimodal (Grava y arena fina)	Arena fina	Muy platicúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los finos
MTeq 18	Arena muy fina	Unimodal (Limo)	Arena fina	Muy platicúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 19	Arena fina	Bimodal (Arena fina y arena gruesa)	Arena fina	Muy platicúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Simétrica
MTeq 20	Arena fina	Bimodal (Arena fina y limo)	Arena fina	Muy platicúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos
MTeq 21	Arena fina	Polimodal (Arcilla, arena fina y grava)	Arena fina	Platicúrtica	Extremadamente pobre seleccionado	Asimétrica hacia los más finos

Tabla 3: análisis estadístico para la distribución granulométrica, los parámetros pueden indicar: promedio de tamaño, energía y tipo del medio de transporte, áreas fuente, selección, simetría de la selección y dispersión.

FIGURAS

Facies code	Facies	Sedimentary Structures	Interpretation
Gms	massive, matrix supported gravel	grading	debris flow deposits
Gm	massive or crudely bedded gravel	horizontal bedding, imbrication	longitudinal bars, lag deposits, sieve deposits
Gt	gravel, stratified	trough cross beds	minor channel fills
Gp	gravel, stratified	planer cross beds	longitudinal bars, deltaic growths from older bar remnants
St	sand, medium to very coarse, may be pebbly	solitary or grouped trough cross beds	dunes (lower flow regime)
Sp	sand, medium to very coarse, may be pebbly	solitary or grouped planer cross beds	linguoid, transverse bars, sand waves (lower flow regime)
Sr	sand, very fine to coarse	ripple cross lamination	ripples (lower flow regime)
Sh	sand, very fine to very coarse may be pebbly	horizontal lamination parting or streaming lineation	planer bed flow (upper flow regime)
Sl	sand, very fine to very coarse may be pebbly	low angle (<10°) cross beds	scour fills, washed-out dunes, antidunes
Se	erosional scours with intraclasts	crude cross bedding	scour fills
Ss	sand, fine to very coarse, may be pebbly	broad, shallow scours	scour fills
Fl	sand, silt, mud deposits	fine lamination, vey small ripples	overbank or waning flood
Fsc	silt, mud	laminated to massive	backswamp deposit
Fcf	mud	massive, with freshwater molluscs	backswamp pond deposits
Fm	mud, silt	massive, desiccation cracks	overbank or drape deposits
C	coal, carbonaceous mud	plant, mud films	swamp deposits
P	carbonate	pedogenic features	paleosol

Figura 1: código de facies, con estructuras sedimentarias e interpretación. Tomado de Miall 1978.

Sorting (σ_1)		Skewness (Sk_1)		Kurtosis (K_G)	
Very well sorted	<0.35	Very fine skewed	+0.3 to +1.0	Very platykurtic	<0.67
Well sorted	0.35–0.50	Fine skewed	+0.1 to +0.3	Platykurtic	0.67–0.90
Moderately well sorted	0.50–0.70	Symmetrical	+0.1 to -0.1	Mesokurtic	0.90–1.11
Moderately sorted	0.70–1.00	Coarse skewed	-0.1 to -0.3	Leptokurtic	1.11–1.50
Poorly sorted	1.00–2.00	Very coarse skewed	-0.3 to -1.0	Very leptokurtic	1.50–3.00
Very poorly sorted	2.00–4.00			Extremely leptokurtic	>3.00
Extremely poorly sorted	>4.00				

Figura 2: Valores límite para la desviación estándar, curtosis y asimetría. Según Folk y Ward (1957).

SECCIÓN 2

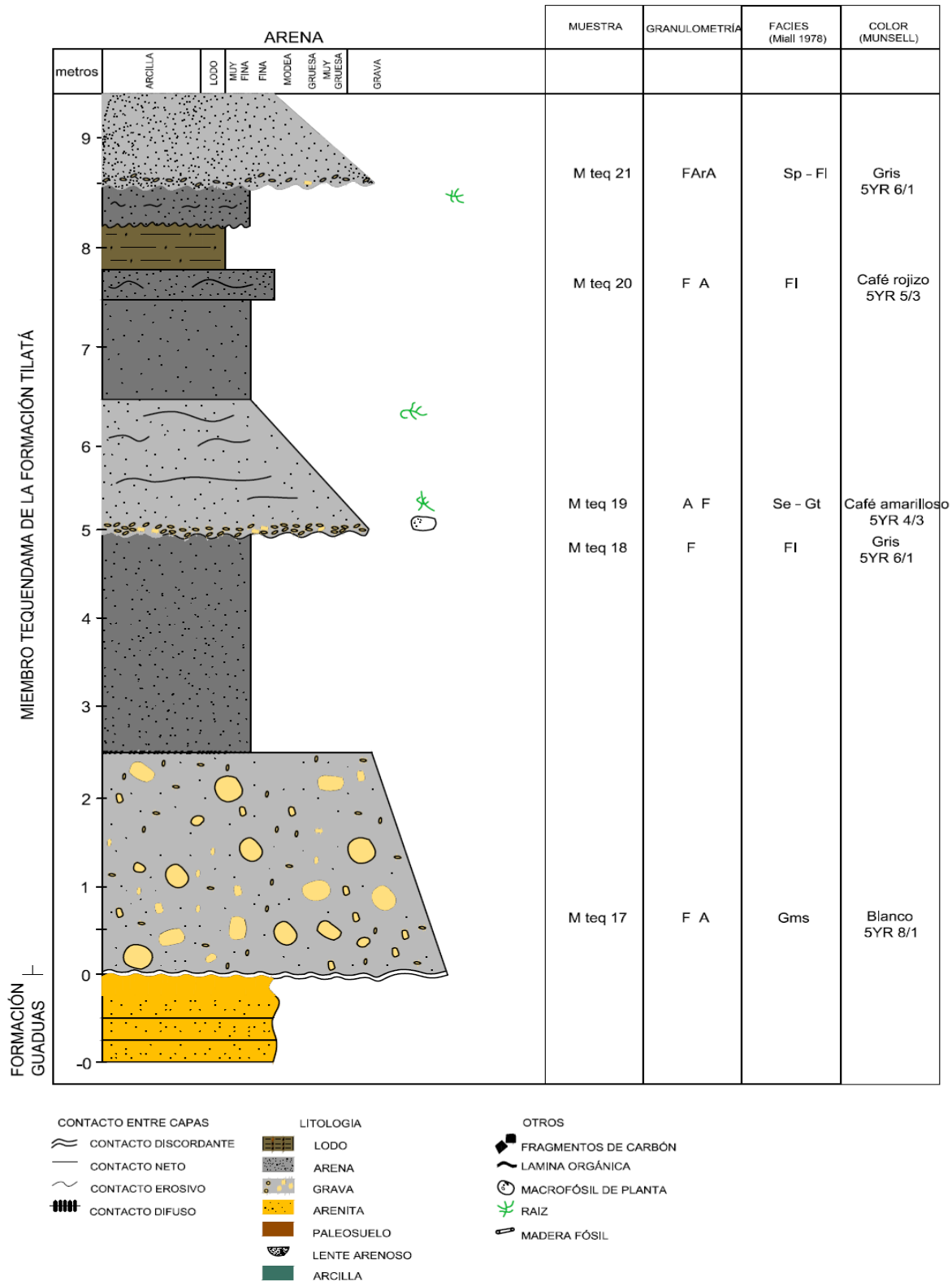


Figura 3: sección estratigráfica 2.

LITOLOGIA

 LODO

 ARENA

 GRAVA

 ARENITA

 PALEOSUELO

 ARCILLA

 LENTE ARENOSO

CONTACTOS ENTRE CAPAS

 Contacto Discordante

 Contacto Neto

 Contacto Erosivo

 Contacto Difuso

OTROS

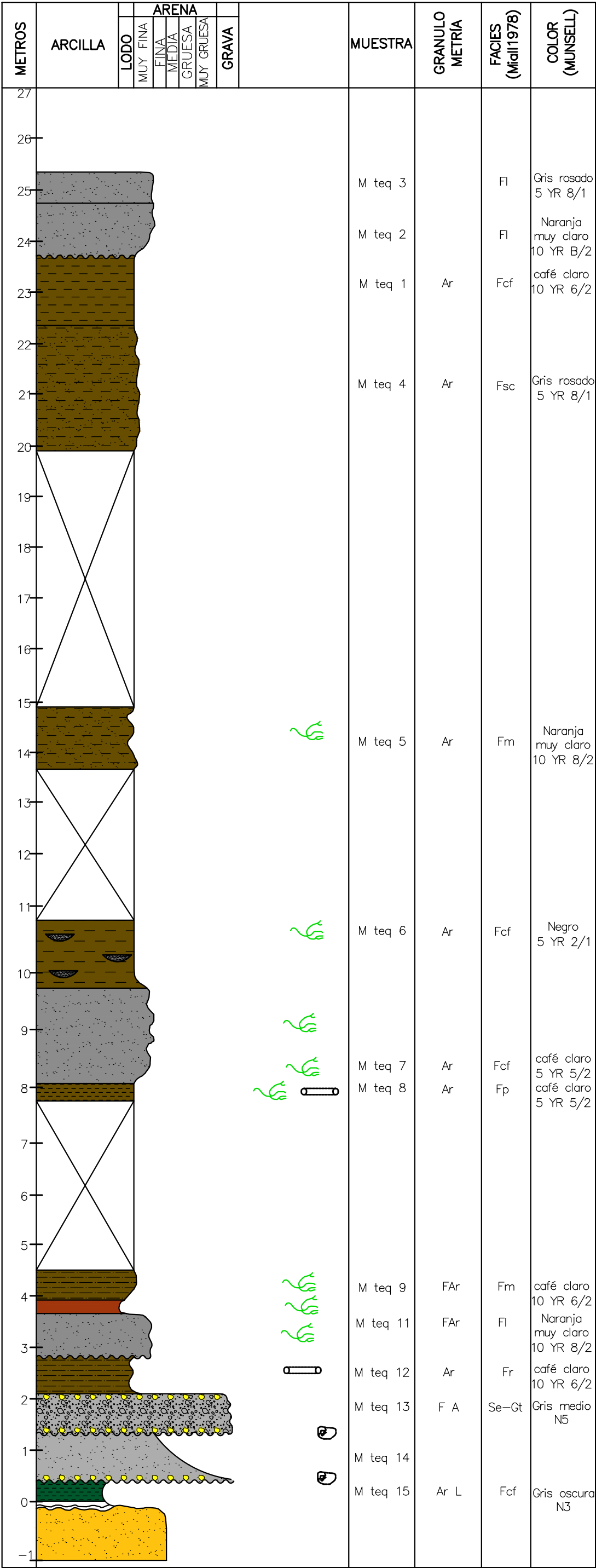
 Fragmentos de Carbón

 Lámina Orgánica

 Macrofósil de planta

 Raíz

 Madera Fósil



SECCIÓN ESTRATIGRÁFICA: 2 MIEMBRO TEQUENDAMA—FORMACIÓN TILATÁ