

**INTERPRETACIÓN DE LA ESTRUCTURA GEOLÓGICA Y LA TENDENCIA
PALEOAMBIENTAL DURANTE EL EOCENO-PLEISTOCENO DE LA
SUBCUENCA DEL RÍO TEUSACÁ, CUNDINAMARCA**

FREDY ARIEL BARRERA CÁRDENAS

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2020**

**INTERPRETACIÓN DE LA ESTRUCTURA GEOLÓGICA Y LA TENDENCIA
PALEOAMBIENTAL DURANTE EL EOCENO-PLEISTOCENO DE LA
SUBCUENCA DEL RÍO TEUSACÁ, CUNDINAMARCA**

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en Gestión de Cuencas
Hidrográficas**

FREDY ARIEL BARRERA CÁRDENAS

**Directora:
LIGIA LUGO VARGAS, MSc.**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A mi hijo Gabriel Esteban.

A mi madre Estrella.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Estrella, a mi hijo Gabriel por el apoyo Económico y Moral.

A los funcionarios de Mineralogía del Suelo, del Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC. A Antonio Patiño, al profesor Jairo Marulanda (QEPD), al profesor Pulido, al profesor Segundo Insuasti.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	vi
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	4
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
2.1. Antecedentes	6
2.2. Formulación del problema	6
2.3. Hipótesis de trabajo	7
2.4. Justificación	7
3. MARCO METODOLOGICO	8
3.1 Objetivo General	8
3.2 Objetivos Específicos	8
3.3. Descripción de la metodología empleada para desarrollar cada objetivo específico	8
3.3.1. Procedimiento para el Análisis de Paleoesfuerzos en las fases de orogenia Andina (3Ma) y fase final de ajuste (1Ma) Eoceno-Pleistoceno	8
3.3.2. Procedimiento para el análisis y diseño de la curva Paleoambiental en la Subcuenca del Río Teusacá	10
4. MARCO TEÓRICO	14
5. MARCO EPISTEMOLÓGICO	19
6. RESULTADOS Y ANALISIS	23
6.1 Análisis de Paleoesfuerzos en las fases de Orogenia Andina (3Ma) y Fase Final de Ajuste (1Ma) Eoceno-Pleistoceno en la Subcuenca del Río Teusacá	23
6.2. Interpretación de la tendencia paleoambiental Eoceno-Pleistoceno de la Subcuenca del Río Teusacá.	38
7. DISCUSION DE RESULTADOS	48
7.1. De los Paleoesfuerzos en las fases de Orogenia Andina (3Ma) y Fase Final de Ajuste (1Ma) Eoceno-Pleistoceno en la Subcuenca del Río Teusacá.	48
7.2. De la Curva Paleoclimática y Paleoambiental en la Subcuenca del Río Teusacá.	49
8. CONCLUSIONES	51
9. RECOMENDACIONES	52
10. REFERENCIAS	56

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las mediciones de Planos Estructurales Coordenadas Gauss-Krüeger, MAGNA-BOGOTÁ. Fuente: Elaboración propia.	9
Figura 2. Esquema del proceso realizado en el presente trabajo para la obtención de una curva paleoambiental aproximada para la Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración Propia.	11
Figura 3. Esquema del diagrama de Mohr para ilustrar el criterio de fractura de Coulomb y la orientación de las fracturas por corte (Fuente: Scholz, 2007).	16
Figura 4. Planos estructurales en la formación Plaeners del Grupo Guadalupe, estación El Hato (coordenadas 1007503N, 1003577E, 3000msnm) en la subcuenca del Río Teusacá. S1: Estratificación. L1, L2: Par de fracturas debidas a esfuerzos de compresión regional. Fuente: Fotografía del Autor de este trabajo.	24
Figura 5. Paleoesfuerzos normales (3) y plano de esfuerzos principales (1 y 2) estación El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm). Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 6. Horizontes de suelo y espesores aproximados en el tope de la Estación El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm), Formación Plaeners y Degradación Fm Marichuela (Oligoceno). Fuente: Fotografía del Autor de este trabajo.	27
Figura 7. Plumitas de agrietamiento por gelivación en la formación Plaeners. Fuente: Fotografía del Autor de este trabajo.	28
Figura 8. Contacto Fallado (Falla Santa Elena) y replicación Formación Plaeners con la Formación Labor, Estación El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm). Fractura Pretectónica S1 y Fractura Sintectónica S2. Fuente: Fotografía Autor de este trabajo.	28
Figura 9. Paleoesfuerzos, falla, estratificación y deslizamiento de falla en la estación vereda El Hato 1007503N, 1003577E, 3000 msnm. Fuente: Elaboración Propia	29
Figura 10. Fracturas Pretectónicas S2 y Sintectónicas S1 observada sobre rocas aflorantes costado oriental Río Teusacá, Estación Restaurante La Mazorca 1008643N, 1007978E, 2895msnm. Fuente: Fotografía Autor de este trabajo.	30
Figura 11. Falla de Teusacá y pares de fracturas Pre y Sintectónicas. Costado oeste viaducto Bogotá-La Calera cerca de Kurnik-Puente y Box Culvert (1009078N, 1008635E, 2815msnm). Fuente: Fotografía Autor de este trabajo.	31
Figura 12. Estación B Kurnik-Puente y Box (1009078N, 1008635E, 2895msnm). Pares de Fracturas Pre y Sin Tectónicas en la Formación Labor del Grupo Guadalupe. Fuente: Fotografía del Autor de este trabajo.	32
Figura 13. Fracturas aparentes Pretectónicas S1 y Sintectónicas S2 en la Estación Kurnik-Parque Extremo (1009196N, 1008799E, 2819msnm). Fuente: Fotografías del Autor de este trabajo.	33
Figura 14. Dirección de los esfuerzos principales Vs Deformación frágil en la estación Kurnik-Parque Extremo. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 15. Mapa Geológico Ortocorregido Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 16. Corte Páramo de Chingaza - La Calera. Fuente: Elaboración propia.	37

- Figura 17.** Curva Paleoambiental aproximada en el área de la Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración propia. 40
- Figura 18.** Curva paleoambiental y paleobatimétrica, límite de la capa glacial, límite páramo-bosque andino y curva paleobatimétrica aproximada en los últimos 126.000 años en la cordillera oriental de Colombia. Fuente: Elaboración propia. 42
- Figura 19.** Simulaciones con el algoritmo Simplex de la curva paleo-ambiental Plioceno-Holoceno en el área de la Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración propia. 44
- Figura 20.** Contraste de la simulación de las tendencias Plioceno-Holoceno sin actividad antrópica, Plioceno-Holoceno con actividad antrópica y Plioceno-Holoceno obtenida con datos de los últimos ciclos glaciales en la Cordillera Oriental recopilados por Adriessen et al. (1993), IGAC (2000) y Harland et al. (1989) (Tabla 1). Fuente: Elaboración propia. 46
- Figura 21.** Simulaciones con el modelo Simplex de la curva paleoambiental Plioceno-Holoceno con relación a la altitud del bosque Andino en el área de la Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración propia. 46
- Figura 22.** Simulaciones de la curva Paleoambiental Plioceno-Holoceno obtenidas con el modelo Simplex, sobre la cual se observa variaciones cíclicas ideales a partir de los datos obtenidos por tendencia lineal. Fuente: Elaboración propia. 47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Recopilación de información de los últimos ciclos glaciales desde hace 200.000 años hasta el presente en la Cordillera Oriental.	16
Tabla 2. Resumen de los resultados estructurales estación vereda El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm) en la Subcuenca del Río Teusacá.	23
Tabla 3. Datos Estructurales tomados costado occidental viaducto Bogotá-La Calera, Estación A cerca del restaurante Kurnik-Puente y Box Culvert (1009078N, 1008635E), 2815msnm sobre Río Teusacá.	31
Tabla 4. Datos Estructurales tomados costado oriental viaducto Bogotá-La Calera, Estación B cerca del restaurante Kurnik-Puente y Box Culvert (1009078N, 1008635E), 2815msnm sobre Río Teusacá.	32
Tabla 5. Datos estructurales estación Kurnik-Parque Extremo (1009196N, 1008799E, 2819msnm).	33
Tabla 6. Datos estructurales estación La Cabaña sobre el río Teusacá (1013446N, 1019830E), 2584msnm.	35
Tabla 7. Resumen de los resultados de las estimaciones de las diferentes líneas tendencias y su aproximación para la obtención de una curva paleoclimática-paleoambiental en el área de estudio.	41
Tabla 8. Comparación líneas Bosque Andino en curvas Plioceno-Holoceno y curva Plioceno-Pleistoceno (Sin Cuaternario).	43
Tabla 9. Aproximaciones lineales a la curva de Bosque Andino en el periodo Plioceno-Holoceno.	43
Tabla 10. Aproximaciones lineales a la curva de Bosque Andino en el periodo Plioceno-Pleistoceno (Sin Cuaternario).	43
Tabla 11. Simulación tendencia polinómica, pendiente, exponencial y picos de la curva del Bosque Andino en el periodo Plioceno-Holoceno.	45
Tabla 12. Simulación tendencia polinómica, pendiente, exponencial y análisis de valles de la curva del Bosque Andino en el periodo Plioceno-Pleistoceno sin Cuaternario.	45
Tabla 13. Modelo en programa GAMS sin preguntas, las preguntas se deben plantear para cada caso.	53
Tabla 14. Como insertar una tabla de datos en un modelo GAMS.	54

RESUMEN

El objetivo de este trabajo estuvo relacionado con la elaboración de una interpretación de la estructura geológica y la tendencia paleoambiental durante el Eoceno al Pleistoceno de la subcuenca del Río Teusacá, Cundinamarca. Se realizaron observaciones directamente sobre las rocas, se tomaron datos de rumbo y buzamiento. Para encontrar el patrón esfuerzo-deformación se utilizó el método gráfico de Anderson (1951). Para el diseño de la Curva Paleoclimática y Paleoambiental se utilizó el modelo Simplex y se utilizaron los datos obtenidos por por Adriessen et al. (1993), IGAC (2000) y Harland et al. (1989). Durante la Orogenia Andina, la tensión principal regional (σ_1) fue Este-Oeste (80% de persistencia) y la tensión de corte (σ_2) fue Sur-Norte. El acortamiento calculado para la elevación de 2800 metros de la Cordillera Oriental en el área de estudio fue de 28000 metros. Durante la fase final de ajuste, estructuras como falla de Bogotá, falla de Teusacá, falla de Pericos, falla de San Lorenzo y falla de Santa Elena, con tendencia Sur-Norte, se volvieron dominantes para el esfuerzo regional principal. El levantamiento de la Cordillera aparentemente se detuvo durante la Orogenia Andina. La Subcuenca del Río Teusacá presentó dos etapas en su desarrollo: la Orogenia Andina (3My) y la Fase Final de Ajuste (1Ma). Durante la Orogenia Andina, el área de estudio quedó expuesta desde el nivel del mar, donde se recuperaron los densos datos de palinología del bosque de Mauritia, hasta su posición actual de 2800 msnm según Adriessen et al. (1993), IGAC (2000) y Harland et al. (1989). En la Fase Final de Ajuste (1Ma), la cuenca comienza con la Periodicidad Glacial, el nivel inferior de la capa de Hielo fue de 2600 msnm, hace 36000 años durante el período Winsconsiniano. La forma estructural de la Cuenca del Río Teusacá podría definirse como un Golpe Estructura de Horst en el borde del sinclinario de Teusacá, con tendencia Sur-Norte. Además, el desprendimiento del sistema de fallas de ventilador imbricado viene a ser la parte superior de la formación dura (últimos depósitos cretácicos superiores). El único lugar donde es posible medir fracturas y planos estratigráficos en el área es la formación dura (Grupo Guadalupe Inferior), las unidades estratigráficas superiores se desintegraron o fueron sometidas a

tensión. La curva paleoclimática muestra el comportamiento de las glaciaciones, sus picos y límites inferiores de los últimos 2.2 Ma. Los resultados obtenidos permitieron conocer un modelo de la evolución geológica de la subcuenca del Río Teusacá y comprender la evolución paleoambiental de la región durante los últimos ciclos en el área de estudio.

Palabras clave: paleoecología, subcuenca fluvial, geología estructural, proceso geológico, cuaternario, edad glacial.

ABSTRACT

The objective of this work was related to make an interpretation of the geological structure and the paleoenvironmental tendency during the Eocene to the Pleistocene sub-basin of the Teusacá River, Cundinamarca. Observations were made directly on the rocks, heading and dive data were taken. To find the stress-strain pattern, the graphic method of Anderson (1951) was used. For the design of the Paleoclimatic and Paleoenvironmental Curve, the Simplex model was used and the work carried out by Adriessen et al. (1993), IGAC (2000) and Harland et al. (1989) was used as a reference. During the Andean Orogeny, the regional main tension σ_1 was East-West (80% persistence) and the cut-off voltage σ_2 was South-North. The shortening calculated for the elevation of 2800 meters of the Eastern Cordillera in the study area was 28.000 meters. During the final phase of adjustment, structures such as the Bogotá fault, the Teusacá fault, the Pericos fault, the San Lorenzo fault and the Santa Elena fault, with a South-North trend, became dominant for the main regional effort. The uprising of the Cordillera apparently stopped during the Andean Orogeny. The Teusacá River Sub-basin presented two stages in its development: the Andean Orogeny (3My) and the Final Adjustment Phase (1Ma). During the Andean Orogeny, the study area was exposed from sea level, where the dense palynology data of the Mauritia forest was recovered, to its current position of 2800 masl according to Adriessen et al. (1993), IGAC (2000) and Harland et al. (1989). In the Final Adjustment Phase (1Ma), the basin begins with the Glacial Periodicity, the lower

level of the Ice layer was 2600 meters above sea level, 36000 years ago during the Winsconsinian period. The structural shape of the Teusacá River Basin could be defined as a Horst Structure Strike on the edge of the Teusacá synclinary, with a South-North trend. In addition, the detachment of the embedded fan failure system becomes the upper part of the hard formation (last upper cretaceous deposits). The only place where it is possible to measure fractures and stratigraphic planes in the area is hard formation (Lower Guadalupe Group), the upper stratigraphic units disintegrated or were subjected to tension. The paleoclimatic curve shows the behavior of the glaciations, their peaks and lower limits of the last 2.2 Ma. The results obtained allowed us to know a model of the geological evolution of the sub-basin of the Teusacá River and understand the paleoenvironmental evolution of the region during the Last cycles in the study area.

Key words: paleoecology, river basins, geological deformation, geological processes quaternary, ice age.

1. INTRODUCCIÓN

La temática del presente trabajo hace referencia a la formación de la estructura geológica y a la tendencia paleoambiental Eoceno-Pleistoceno en la subcuenca del Río Teusacá. El interés es profundizar en el análisis de la formación de la estructura geológica en este periodo geológico es precisamente porque la “Formación Bogotá” a la cual es cercada el área de estudio se formó entre el Paleoceno y Eoceno, según Julivert (1963).

El enfoque de la investigación es mixto entre cuantitativo y cualitativo. El objetivo de este trabajo es hacer una interpretación de cómo se llevaron a cabo los procesos paleoestructurales y paleoclimáticos durante el Paleoceno y Eoceno en la subcuenca del Río Teusacá. Esto permitirá determinar la tendencia de paleoesfuerzos y paleoclimatología de esta subcuenca; dado que, en la fase de diagnóstico, en planes de ordenación territorial de una cuenca hidrográfica; se debe determinar el estado del componente físico en el cual, es necesario conocer la geología y geomorfología de la cuenca o subcuenca (MADS, 2014). Existe un vacío en el conocimiento sobre los aspectos paleoestructurales y paleoambientales de la subcuenca del Río Teusacá. Con el presente trabajo se pretende hacer una contribución al conocimiento de la historia geológica de la estructura y la tendencia paleoambiental de esta subcuenca.

El método utilizado para hacer el trabajo fue de tipo combinado entre documental y de observaciones de campo. La investigación se realizó con observaciones de campo directamente sobre las rocas se tomaron datos de rumbo y buzamiento con brújula Brunton. Para determinar el patrón esfuerzo-deformación se utilizó el método gráfico de Anderson (1951). Además, se tuvo como referencia el trabajo realizado por Helmens & Van der Hammen (1994) y para el diseño de la Curva Paleoclimática y Paleoambiental se utilizó el modelo Simplex. El propósito del trabajo estuvo relacionado con la modelación de una la forma y desarrollo histórico geológico y paleoclimático regional de la subcuenca del Río Teusacá con base en la metodología mencionada.

Los objetivos fueron: 1) Analizar la dirección de paleoesfuerzos en la fase de orogenia Andina (3Ma) y fase final de ajuste (1Ma) Eoceno-Pleistoceno aplicando el modelo esfuerzo-deformación y 2) Hacer una percepción de la tendencia paleoambiental Eoceno-Pleistoceno de la subcuenca del Río Teusacá.

A continuación se hace un resumen de la organización de los apartes del presente trabajo.

En primer lugar se hace un planteamiento del problema, se exponen algunos antecedentes referentes al tema, se formula el problema, se presenta la hipótesis de trabajo y la justificación de la investigación.

Seguidamente, se proporciona un marco metodológico; en la cual se plantean los objetivos y el procedimiento metodológico utilizado para el desarrollo de cada objetivo específico y se exponen las bases teóricas de los métodos utilizados para el desarrollo del trabajo.

Luego se hace un marco teórico relacionado con las teorías sobre la historia geológica de la tierra y del origen de la Cordillera Oriental de Colombia

Consecutivamente se expone un marco epistemológico sobre las teorías surgidas sobre la historia geológica de la Tierra desde el siglo XVII, relacionadas con temática de la investigación.

Posteriormente se presentan los resultados de cada uno de los objetivos específicos con su respectivo análisis.

En seguida, se elabora una discusión de los resultados por cada objetivo específico.

A continuación se explican las principales conclusiones de los resultados de la investigación.

Por último se presentan las referencias bibliográficas en orden alfabético utilizadas y citadas en este trabajo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Antecedentes

Las capas de los terrenos del área de estudio al igual que los de la Formación Guaduas y la Formación Bogotá se formaron entre el Paleoceno y Eoceno Inferior (Julivert, 1963). La formación Guaduas emerge en los sinclinales de Río Frío, Neusa, Zipaquirá, Lenguaque, Sesquilé, Sisga, Subachoque, zona de la Calera en sinclinal de Teusacá y hacia el Sur en los sinclinales de Usme y Soacha. La formación Bogotá surge de los Sinclinales de Tunjuelo, Bogotá-Cajicá-Checua, Teusacá, Sesquilé, y Siecha-Sisga (Julivert, 1963). Los tres factores que han influido en la evolución del paisaje, en la sedimentación y en el desarrollo de la vegetación en la Sabana de Bogotá y sus alrededores son: la elevación tectónica de los Andes (entre 5 y 3 Ma), el desarrollo de la gran cuenca tectónica sedimentaria de Bogotá (aprox. 3,5 Ma), las fluctuaciones climáticas cuaternarias y las glaciaciones (2,7 Ma aprox.) (Helmens & Van der Hammen, 1994).

2.2. Formulación del problema

Dentro del proceso de caracterización de una cuenca hidrográfica, en la fase de diagnóstico es fundamental determinar el estado de los componentes: físico, biótico, económico, social y cultural (MADS, 2014). Es esencial la información sobre la geología y geomorfología de la cuenca o subcuenca; principalmente relacionada, con unidades de roca y de suelo (MADS, 2014). En cuanto al aspecto físico, existe un vacío sobre el aspecto estructural y paleoclimático relacionado con la era cuaternaria en la subcuenca del Río Teusacá. El presente trabajo hace una contribución en la interpretación de la historia geológica y la tendencia paleoclimática Eoceno-Pleistoceno en la subcuenca del Río Teusacá. Estos aspectos son básicos en el proceso de planificación de la Subcuenca relacionado con análisis de amenazas naturales o riesgos geológicos.

2.3. Hipótesis de trabajo

Es posible calcular direcciones de paleoesfuerzos a partir de mediciones de rumbo y buzamiento en sets pareados de fracturas sobre rocas, formadas durante la orogenia andina en la Subcuenca del Rio Teusacá.

Se puede lograr generar un modelo simplex (algebraico general) para una curva paleoambiental empleando líneas de tendencias lineal, que explique los cambios climáticos y ambientales a partir del mioceno al cuaternario en la Subcuenca del Rio Teusacá.

2.4. Justificación

El conocimiento de la evolución de la estructura geológica y de la tendencia paleoclimática es base fundamental en un proceso de planificación territorial, máxime cuando se trate de cuencas hidrográficas que tienen que ver no solo con el recurso hídrico sino también con el recurso suelo; por lo tanto, todo proceso de ordenación de cuencas debe tener un análisis del componente geocronológico y geológico; aspecto fundamental en el proceso de planificación de la subcuenca relacionado con análisis de amenazas naturales o riesgos geológicos.

3. MARCO METODOLOGICO

Con el propósito de resolver el problema formulado esta investigación se plantearon los siguientes objetivos.

3.1 Objetivo General

Interpretar la estructura geológica y la tendencia paleoambiental durante el Eoceno al Pleistoceno de la subcuenca del Río Teusacá, Cundinamarca.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar la dirección de paleoesfuerzos en la fase de orogenia Andina (3Ma) y fase final de ajuste (1Ma) Eoceno-Pleistoceno en la subcuenca del Río Teusacá aplicando el modelo esfuerzo-deformación.
- Analizar la tendencia paleoambiental Eoceno-Pleistoceno de la subcuenca del Río Teusacá, aplicando el modelo Simplex.

3.3. Descripción de la metodología empleada para desarrollar cada objetivo específico

3.3.1. Procedimiento para el Análisis de Paleoesfuerzos en las fases de orogenia Andina (3Ma) y fase final de ajuste (1Ma) Eoceno-Pleistoceno

Para hacer el análisis de paleoesfuerzos, se realizaron observaciones de campo y directamente sobre las rocas y se tomaron datos de rumbo y buzamiento con brújula Brunton en cinco sitios a diferentes altitudes; a lo largo del Río Teusacá, ubicados como se observa en la Figura 1.

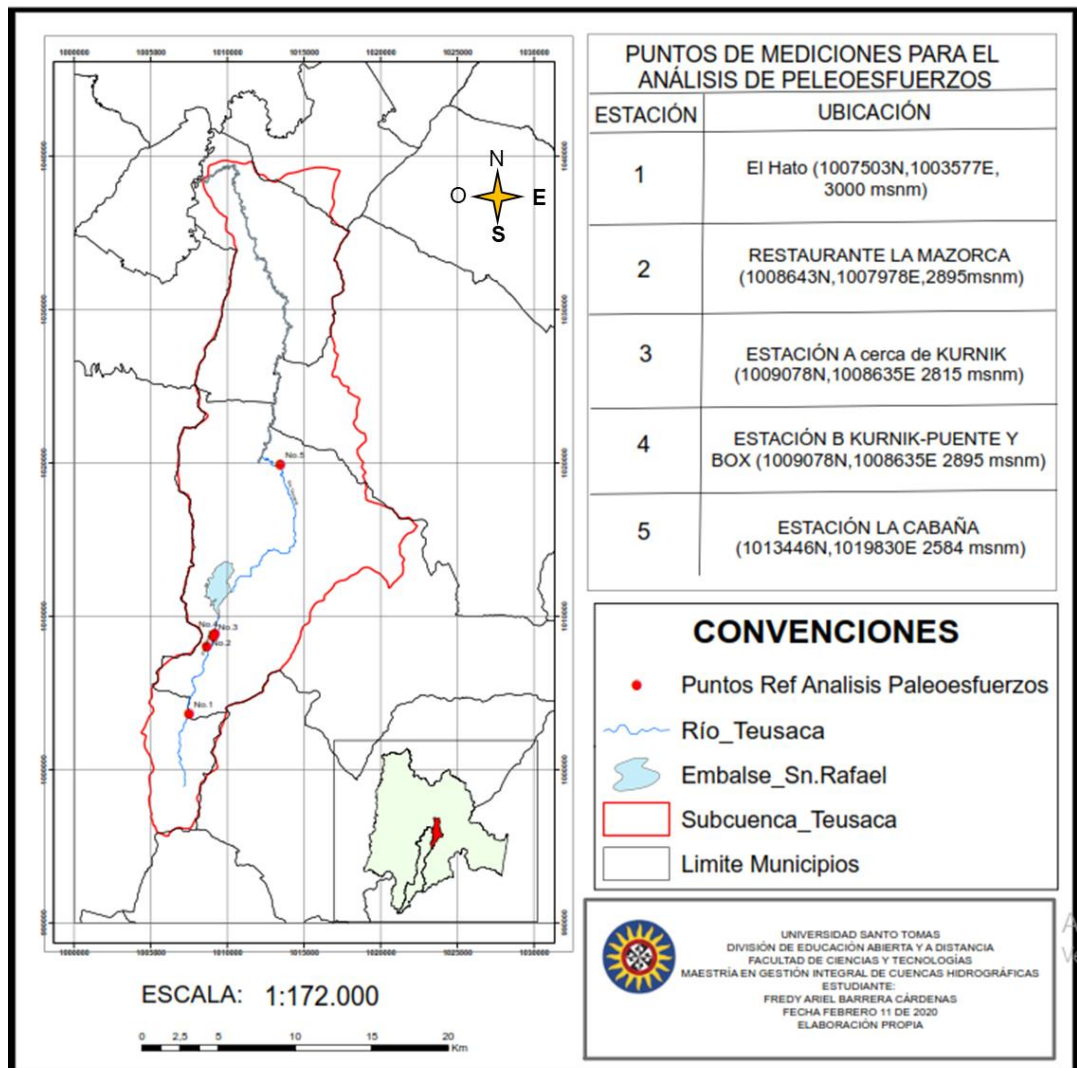


Figura 1. Ubicación de las mediciones de Planos Estructurales Coordenadas Gauss-Krüeger, MAGNA-BOGOTA. Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la dirección de los esfuerzos principales o proyecciones estereográficas se siguió el método de Anderson (1951) utilizando el programa Stereonet 10.0 (Cardozo & Allmendinger, 2013).

Sobre el plano se estimó la bisectriz aguda para el esfuerzo principal σ_1 y la bisectriz obtusa para el cálculo del esfuerzo de corte o cizalla σ_2 , sobre pares de fracturas a 60° . El plano que contiene las dos líneas de dirección de los esfuerzos principales es llamado Plano de Esfuerzos Principales y su polo de construcción

corresponde al esfuerzo normal σ_3 , dado por la fuerza de acción gravitacional (Barrera *et al.* 2006; Biogiorno *et al.* 2011).

3.3.2. Procedimiento para el análisis y diseño de la curva Paleoambiental en la Subcuenca del Río Teusacá

Se asociaron dataciones geocronológicas paleontológicas correspondientes a la Historia Geológica de la Subcuenca en dos periodos: el primero entre los 220.000 años y el periodo actual y el segundo entre los 2,5 Millones de años al periodo actual, cuando ya la Subcuenca se hallaba con su configuración actual (Helmens & Van der Hammen, 1994). Luego se realizó un modelamiento matemático mediante la línea de tendencia de la curva Paleoambiental para asociar toda la información correspondiente a la Geocronología.

Para el diseño de la Curva Paleoambiental se utilizaron los datos recopilados sobre el comportamiento de las glaciaciones en la Cordillera Oriental (Tabla 1) de los siguientes autores: Adriessen *et al.* (1993), IGAC (2000) y Harland *et al.* (1989); siguiendo la metodología del trabajo realizado por Helmens & Van der Hammen (1994). También se tuvo en cuenta para este análisis, los estudios de Van der Hammen *et al.* (1973) sobre estratigrafía y palinología de las formaciones Pliocénicas y del Cuaternario Inferior de la parte central de la Cordillera Oriental de Colombia. El ajuste cronoestratigráfico y geocronológico se efectuó a partir de fuentes de datación del material fósil palinológico de la región de Ubaté (Van Geel & Van der Hammen, 1973). Estos investigadores; realizaron un estudio palinológico en sedimentos de la laguna de Fúquene-Valle de Ubaté; en el cual, fecharon con radiocarbono sedimentos y realizaron una comparación con diagramas de polen; también fecharon con radiocarbono algunas rocas de la Cordillera Oriental y correlacionaron los diagramas de polen de zonas locales con las unidades cronoestratigráficas.

Se utilizó el Algoritmo Simplex (Dantzig, 1963) siguiendo a Graveolis *et al.* (2013) para hacer el modelamiento de la curva paleoclimática; cuyo proceso se muestra en la en la Figura 2. Se utilizó el programa “General Algebraic Modeling System” (GAMS) desarrollado por Brooke *et al.* (1998) para hacer la formulación matemática. Este software implementa algoritmos matemáticos con los cuales se logra resolver problemas de optimización. El programa GAMS contiene un lenguaje de modelización que permite escribir en un editor las fórmulas matemáticas del problema y luego se les aplica una serie de “solvers”. Para este fin se utilizó el programa “Solver”; que está incorporado a Excel. El “Solver” toma los datos formulados con el programa GAMS y los procesa acorde con el Algoritmo Simplex (Dantzig, 1963) y devuelve la solución a la planilla Excel.

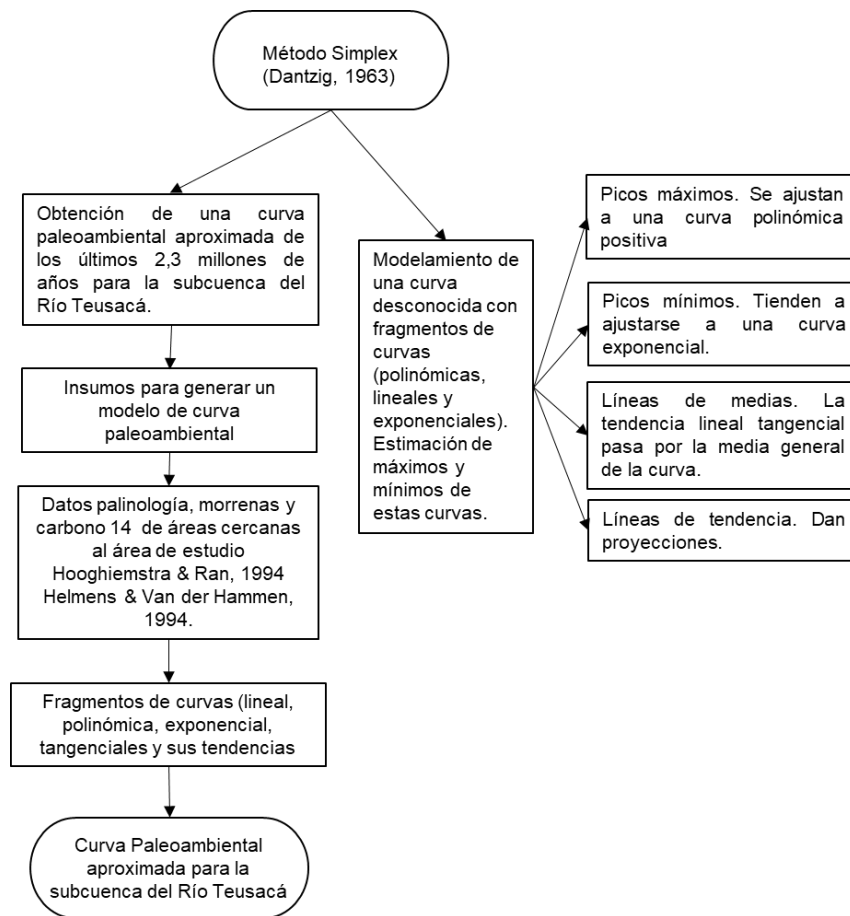


Figura 2. Esquema del proceso realizado en el presente trabajo para la obtención de una curva paleoambiental aproximada para la Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración Propia.

La curva Paleoambiental se generó sobre la curva del límite superior del Bosque Andino y el límite inferior del Páramo y se elaboraron cuatro curvas de tendencia:

1. La Tendencia Lineal presenta el dato promedio.
2. La Tendencia Exponencial presenta el dato mínimo.
3. La Tendencia Polinómica o El Modelo de Derivadas Parciales de segundo orden presenta el dato máximo y la velocidad de descenso del nivel del límite superior del Bosque Andino.
4. La Tendencia Logarítmica presenta la periodicidad de los cambios de altitud del límite superior del Bosque Andino.

Para hacer un estimativo con relación a la periodicidad de los depósitos morrénicos de los estadiales Tagua y Carrizal se construyeron las dos expresiones matemáticas siguientes con base en los datos de la Tabla 1

$$Morrenas(t) = b1 + \frac{x(b1-b2)}{a1-a2} \text{ (Fuente: Elaboración propia)}$$

Donde x es la altura en metros de la morrena y los índices $a1b1$ y $a2b2$ son la edad y la altitud en metros sobre el nivel del mar de los estadiales estudiados para la datación de morrenas (Tabla 1). La ecuación siguiente correlaciona las mediciones de ciclos estadiales e interestadiales.

$$Morrenas(tmed) = b1 + x \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (bn)^2}{\sum_{i=0}^n (an)^2}} \text{ (Fuente: Elaboración propia)}$$

Esta última ecuación se construyó para datar una morrena, consiste en medir la altitud de los cantos y seguidamente se compara con los datos de la Tabla 1; con la finalidad de observar con cual evento coincide o se aproxima para luego correlacionar con los eventos interestadiales más cercanos.

Para explicar este proceso de las dos fórmulas anteriores se da el siguiente ejemplo:

Se quiere hallar la edad en años de algunas morrenas ubicadas en La Paloma (Via La Calera a 2955msnm).

Ciclo glaciar más cercano: Estadial de Fúquene, 18000 años y 2900msnm Límite inferior glaciar.

El Estadial de Fúquene se encuentra entre el Interestadial de Susacá y Interestadial de Santuario.

Interestadial de Susacá: 15000 años y 3600msnm, límite inferior glaciar.

$$Morrenas(t) = -18000 + \frac{2955(-3000)}{-700} = -17995.7 \text{ años}$$

$$Morrenas(t_{med}) = -18000 + 2955 \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (-33000)^2}{\sum_{i=0}^n (6500)^2}} = -17994.9 \text{ años}$$

Como se observa el resultado aplicando las dos fórmulas es muy cercano entre ambas. Lo cual indica que las dos fórmulas se pueden utilizar para hacer los estimativos de la periodicidad de los depósitos morrénicos.

4. MARCO TEÓRICO

La cordillera de los Andes se originó en la Era Mesozoica desde el Jurásico Inferior hasta el Cretáceo Inferior, por un proceso de subducción sobre un continente fijo. A finales del Mesozoico el continente suramericano se separó de África migrando en sentido oeste y originando una fuerte compresión originando el levantamiento de la cordillera de los Andes (Uyeda & Kanamori, 1979). En cuanto a la formación del basamento de los Andes de Colombia; en el Paleozoico existieron dos regiones geológicas, cuyo límite es evidenciado por el sistema de fallas del borde llanero: al oriente existió la región Gondwana (Escudo de Guayana) y al occidente una región alóctona (continente norteamericano); estas dos regiones colisionaron en el tiempo Silúrico-Devónico y contribuyeron al levantamiento de las tres cordilleras. El basamento metamórfico de la Cordillera Oriental tiene correspondencia con un terreno originario del continente norteamericano (Forero-Suárez, 1990; Duque-Caro, 1990; Kellogg & Vega, 1995; Taboada *et al.* 2000).

Alrededor de 6 Ma durante el Mioceno se inició la formación de la Cordillera Oriental de Colombia, por un proceso de colisión de la isla Chocó-Panamá con el margen noroeste de América del Sur, formando un puente continental entre las Américas. Este evento separó el mar Pacífico del mar Caribe, cambiando los patrones de circulación oceánica y tal vez el clima global. Además, deformó y dobló el cinturón orogénico del este de Panamá elevando la Cordillera Oriental de Colombia (Duque-Caro, 1990; Kellogg & Vega, 1995; Taboada *et al.* 2000). Es así como la Cordillera Oriental de Colombia es un cinturón orogénico que ha sufrido una tectónica compresiva y ha sido formada por inversión de una antigua grieta continental (Struth *et al.* 2015). Actualmente, la Cordillera Oriental de Colombia se caracteriza por poseer dos dominios topográficos: 1) una zona axial formada por una meseta alta (Sabana de Bogotá, 2500m) con bajos relieves locales, dominada por un sistema fluvial longitudinal y 2) los flacos de la cordillera en donde el relieve local supera los 1000m de altitud y están dominados por un sistema fluvial transversal (Struth *et al.* 2015).

Con relación a la historia geológica del área de estudio; varios autores (Adriessen *et al.* 1993, Harland *et al.* 1989, Helmens & Van der Hammen, 1994) entre otros, han señalado que los sedimentos de la Sabana de Bogotá y sus alrededores tienen un origen fluvio-lacustre y presentan una edad aproximada de 6 Ma (Neógeno-Cuaternario). Estos mismos autores, sugieren que la formación del levantamiento tectónico de la Cordillera Oriental ocurrió hace aproximadamente entre 3 y 5 Ma. Helmens & Van der Hammen (1994) reportaron que la Formación Chía, los depósitos están compuestos por sedimentos fluviales de grano fino que se pueden observar a lo largo de los ríos principales. Estos depósitos forman terrazas fluviales por erosión, son planas, de suave pendiente y talladas por la acción de las corrientes fluviales actuales.

En cuanto al proceso de la dirección de los paleoesfuerzos no se ha encontrado información del área de estudio. En este trabajo se hace una aproximación en el desarrollo del primer objetivo específico; para lo cual, se tuvo como base teórica el trabajo realizado por Anderson (1951), quien planteó que las fallas son fracturas frágiles que ocurren siguiendo el criterio de Coulomb. El criterio de Coulomb relaciona el esfuerzo cortante τ con la tensión normal σ_n sobre un plano dentro del material, y explica la relación con la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma_n \text{ (Fuente: Anderson, 1951)}$$

En donde el parámetro τ_0 es la cohesión y μ es el coeficiente de fricción interna.

El círculo de Mohr (Figura 3) muestra que la falla ocurrirá en dos planos conjugados, orientada en ángulos agudos a cada lado del principal esfuerzo compresivo máximo σ_1 , con sentidos opuestos de cizallamiento. La intersección de los dos planos está en dirección del esfuerzo intermedio principal, σ_2 . El ángulo $\phi = \tan^{-1}\mu$ es denominado ángulo de fricción interna.

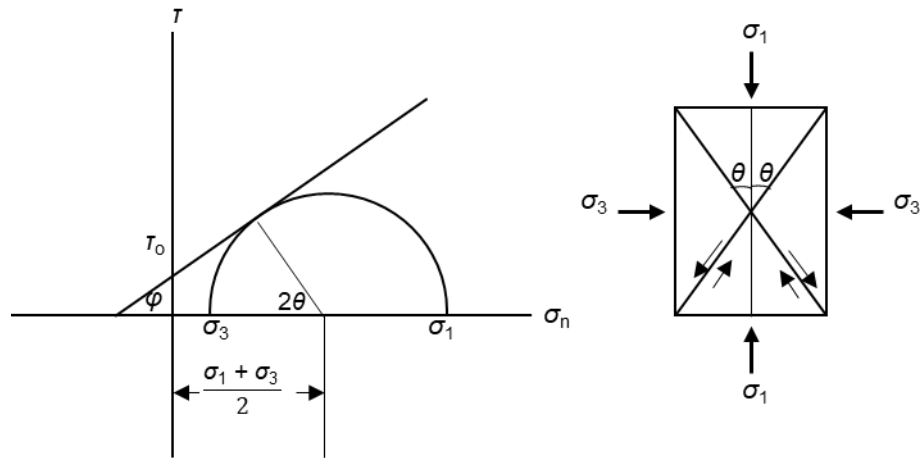


Figura 3. Esquema del diagrama de Mohr para ilustrar el criterio de fractura de Coulomb y la orientación de las fracturas por corte (Fuente: Scholz, 2007).

De la misma forma, se ha interpretado que el desarrollo de la gran cuenca sedimentaria de la Sabana de Bogotá apareció hace 3,5 Ma, y que por un largo período de tiempo estuvo sometida a fuertes fluctuaciones climáticas; las cuales comenzaron aproximadamente hace 2,7 Ma (Adriessen *et al.* 1993). En la Tabla 1, se hace un resumen del comportamiento de las glaciaciones en la Cordillera Oriental con base en datos de Adriessen *et al.* (1993), IGAC (2000) y Harland *et al.* (1989).

Tabla 1. Recopilación de información de los últimos ciclos glaciales desde hace 200.000 años hasta el presente en la Cordillera Oriental.

Ceniza Holoceno	Edad Años (1,3)	Promedio Límite Inferior Paramo (1,2)	Límite Nivel Glacial (1,2)	Nivel del Mar (1,3)
Estadial El Abra	6500	2900	3800	0
Interestadial de Guantiva	7250	3200	4100	400
Estadial de Ciega	12000	2800	3200	-200
Interestadial de Susaca	15000	2900	3600	0
Estadial de Fuquene	18000	2200	2900	0
Interestadial de Saravita	21000	3600	-	-
Estadial de Guican	25000	2600	2900	-400
Interestadial de Santuario	27500	3800	4200	-
Estadial de Faca	30000	3000	3300	0
Interestadial de Tenjo	32000	-	-	300
Estadial de Tagua	34500	500	2600	-800
Interestadial de Chitagota	39000	3000	3400	0

Ceniza Holoceno	Edad Años (1,3)	Promedio Límite Inferior Paramo (1,2)	Límite Nivel Glacial (1,2)	Nivel del Mar (1,3)
Estadial del Carrizal	42500	800	2800	-
Interestadial de Bachue	55000	3000	3300	-
Estadial de Bogotá	70000	2800	3200	-800
Interestadial de Florida	78000	-	-	700
Estadial de Tres Esquinas	88000	1800	2900	0
Interestadial del Cacique	99000	-	-	500
Estadial de La Isla	112000	2600	3000	0
Interglacial de Paloblanco	128000	-	-	500
Subense	126000	-	-	-

Fuente: 1) Adriessen et al. (1993), 2) IGAC (2000) y 3) Harland et al. (1989).

Junto con la fluctuación paleoclimática, la vegetación del Bosque Andino de la Sabana de Bogotá, estuvo sometida a cambios considerables a través del tiempo geológico. Según los estudios de polen fósil de Van Geel & Van der Hammen, (1973), Hooghiemstra & Ran, (1994) y Bogotá-Ángel *et al.* (2011); en el Plioceno los bosques de la Sabana de Bogotá y sus alrededores estuvieron dominados por árboles de los géneros *Vallea* y *Myrica* y un número reducido de árboles del género *Weinmannia*. Hace aproximadamente 3,1 Ma predominaron los bosques del género *Polylepis* y hace aproximadamente 2,9 Ma los componentes principales del bosque Andino predominaron árboles del género *Weinmannia*, disminuyendo considerablemente los árboles de *Vallea* y *Myrica*. Con la unión del Istmo de Panamá al continente suramericano en el Plioceno, parte de la vegetación del hemisferio norte llegó a América del sur. Como se ha demostrado en el registro fósil de polen, hace aproximadamente 2,7 Ma; los árboles del género *Alnus* provenientes del hemisferio norte se establecieron y dominaron los bosques de la zona de la Sabana de Bogotá desplazando los bosques de *Weinmannia*. Por último, árboles del género *Quercus* se establecieron en la zona de la Sabana de Bogotá hace aproximadamente 1 Ma y modificaron el aspecto del bosque andino (Van Geel & Van der Hammen, 1973; Hooghiemstra & Ran, 1994; Bogotá-Ángel *et al.* 2011).

Un análisis interesante fue el realizado por Van Geel & Van der Hammen, (1973); quienes utilizaron radiocarbono para fechar sedimentos con palen de la laguna de Fúquene y algunas rocas de la Cordillera Oriental; además correlacionaron los diagramas de polen de zonas locales con unidades cronoestratigráficas.

Los datos de la Tabla 1 y la información cronoestratigráfica de Van Geel & Van der Hammen, (1973) se tuvieron en cuenta para realizar la interpretación de la tendencia paleoambiental Eoceno-Pleistoceno del área de estudio; en desarrollo del segundo objetivo específico de este trabajo y se utilizó el método simplex para el modelaje de la curva paleoclimática.

El método más conocido para el problema de optimización es el algoritmo simplex desarrollado por Dantzig (1963). La programación lineal es un problema de optimización que consiste en maximizar o minimizar una función lineal sobre un determinado ámbito. El ámbito consta de un conjunto de restricciones lineales. El método simplex es un algoritmo algebraico interactivo; comienza con una base primaria factible y usa operaciones pivote hasta que se obtenga una solución óptima al problema que se está analizando (Graveolis *et al.* 2013).

Graveolis *et al.* (2013) define de forma estándar del método simplex en Programación Lineal como sigue:

$$\begin{array}{ll} \min c^T x & \\ \text{Si y solo si} & \\ Ax = b & \text{(Programación Lineal)} \\ x \geq 0 & \end{array}$$

Donde $A \in R^{m \times n}$, $c, x \in R^n$, $b \in R^m$ y T denota transposición. Suponga que A tiene rango completo, $\text{rango}(A) = m$ ($m < n$).

El problema doble asociado con Programación Lineal lo expresa como:

$$\begin{array}{ll} \max b^T x & \\ \text{Si y solo si} & \\ A^T w + s = c & \text{(DP)} \\ s \geq 0 & \end{array}$$

Donde $w \in R^n$ y $s \in R^n$ (Graveolis *et al.* 2013).

5. MARCO EPISTEMOLÓGICO

La historia geológica de la Tierra se ha venido construyendo a través de teorías; como las expuestas en los siglos XVII y XVIII basadas en el relato bíblico del diluvio como factor geológico que moldeó la superficie terrestre; luego en el siglo XIX aparecieron las teorías catastrofista, actualista y teoría actualmente aceptada de la deriva continental. En la actualidad se sigue construyendo la historia geológica de la Tierra de una forma interdisciplinaria; con base en técnicas principalmente de física, matemáticas, geoquímica, dataciones por radioisótopos, paleontología, estratigrafía y observaciones satelitales.

Se mencionan en este aparte las principales teorías y conceptos que han aportado al conocimiento de la historia geológica del Planeta Tierra. A finales del siglo XVII Niels Stensen (1638-1686), presentó por primera vez, los conceptos de estrato y sedimento; además propuso los principios básicos de la estratigrafía (superposición, horizontalidad y continuidad de los estratos rocosos); con base en el principio de la superposición de capas rocosas propuesto por Avicena en el siglo XI. La estratigrafía permite hacer una datación relativa de las rocas y de los fósiles insertados en estas. Este geólogo sentó las bases de tres disciplinas actuales de la geología: cristalografía, estratigrafía y paleontología (Castaño-Fernández, 1987).

A finales de siglo XVIII aparecieron dos teorías basadas en la importancia del agua (neptunista) y del fuego (plutonista) en el moldeamiento de la corteza terrestre. Abraham Gottlob Werner (1749-1817) propuso que la formación de las rocas ocurrió en ambientes acuáticos por sedimentación. Categorizó las rocas de la corteza terrestre en: primarias (granito), secundarias, terciarias y cuaternarias. De acuerdo con esta teoría, cada tipo de roca se formó en un tiempo particular en la historia geológica de la Tierra. Estableció su escala de datación relativa de la corteza terrestre en las eras: Primaria actualmente Paleozoica, Secundaria actualmente Mesozoica, Terciaria actualmente Cenozoica y Cuaternaria actualmente Antropozoica (Pelayo, 1996; Fernández-López 1988). James Hutton (1726-1797) aceptó la propuesta de Werner y además, propuso su teoría de que por acción del

calor interno del planeta Tierra, se consolidaron las rocas en el fondo marino formadas por material sedimentario y que luego este calor interno elevaba estas rocas hasta la superficie. Además, indicó que los procesos geológicos son lentos y estableció una forma de geocronología relativa (Pelayo, 1996).

A principios del siglo XIX surgieron debates sobre las teorías catastrofistas, actualistas y uniformistas. El paleontólogo Georges Cuvier (1769-1832), propuso la teoría catastrófica; este autor manifestaba que durante la historia geológica de la Tierra se producían cataclismos geológicos que conllevaban a la destrucción total de fauna y flora y al surgimiento de nuevas especies y sugirió las bases para la teoría evolucionista (Fernández-López, 1988; Pelayo 1986). Lyell (1797-1875) se opuso a la teoría catastrófica y propuso su teoría actualista en la cual manifestaba que “los cambios ocurridos sobre la superficie terrestre en el pasado se podrían explicar por los cambios ocurridos en el presente”. El actualismo supone que todos los cambios que habían ocurrido en la historia geológica de la Tierra, se habían dado por los mismos fenómenos físicos y geológicos que actuaban en el presente con un ritmo lento y gradual que suponía una gran duración de los tiempos geológicos (Castaño-Fernández, 1987; Pelayo, 1996).

A finales del siglo XIX Eduard Suess (1831-1914) integro las dos teorías de los sistemas catastrofismo y actualismo; y manifestó que los fenómenos catastróficos y la dinámica regular actualismo, contribuyeron de alguna forma al modelamiento de la corteza terrestre (Pelayo 1996).

De otra parte, Alfred Lothar Wegener (1880-1930) propuso en 1912 la teoría de la deriva continental. Manifestaba que en tiempos pasados la configuración de los continentes estaba inmersa en un continente grande denominado Gondwana; en el cual se incluían: Antártica, América del Sur, Australia, África e India. Además, indicó que los continentes no son estables y que se mueven horizontalmente, cuya fuerza impulsora de este movimiento se da por el flujo de convección y por la rotación de la Tierra. Explicó también, que existen dos tipos de corteza: la corteza continental y la corteza oceánica. La placa oceánica es de mayor densidad y en algunos sitios se hunde debajo de la placa continental (subducción). También indicó que, en algunas

partes del globo terráqueo las placas se chocaron y produjeron la formación de montañas y cordilleras. Actualmente existe evidencia de que los continentes se mueven horizontalmente y además es ampliamente conocido el fenómeno de subducción; estas evidencias han contribuido a la aceptación de esta teoría partir de 1960 (Pérez-Malvárez et al. 2006; Herzberg et al. 2010; Nikishin, 2011).

Según Nikishin (2011) y Zalasiewicz & Williams (2015), los procesos tectónicos en placa comenzaron en el planeta Tierra hace aproximadamente entre 4,3 y 4 miles de millones de años (Ga); cuyo mecanismo tectónico fue impulsado por la alta temperatura del manto en relación con la temperatura más baja de la corteza oceánica. Las placas tectónicas normales actuaron durante el Proterozoico y el Fanerozoico con el ensamblaje periódico de los continentes. Estos autores son conformes con la teoría plutonista de Werner propuesta en el siglo XVIII y que actualmente es aceptada.

Simultáneamente con el proceso de formación de las capas de la tierra, ocurrieron grandes variaciones en el clima global. La reconstrucción climática en la historia geológica del planeta; se basa principalmente, en la composición isotópica del oxígeno y en las conchas fósiles de pequeños organismos marinos denominados foraminíferos (Herzberg et al. 2010). Se ha detectado, que durante millones de años la temperatura global osciló entre cálida con medias anuales cálidas superiores a 10 °C en regiones polares y climas gélidos con capas de hielo que cubrieron la mayoría de los continentes de latitudes medias (Ward, 2006). Las glaciaciones intermitentes comenzaron hace aproximadamente 2.500 millones de años, tal vez asociadas con la oxigenación de la atmósfera de la Tierra por la aparición de organismos fotosintetizadores (Ward, 2006). Desde hace aproximadamente 3.800 Ma, se estableció en el planeta un sistema climático que ha mantenido continuamente un ambiente propicio para la vida; con agua líquida en la superficie que se intercambia con hielo polar (Ward, 2006, Goosse et al. 2010; Nikishin, 2011; Zalasiewicz & Williams 2015).

Los eventos volcánicos de los periodos geológicos: Pérmico, Triásico, Jurásico, Cretácico y Paleoceno, habrían provocado que enormes volúmenes de CO₂ y de

metano se incorporaran a la atmosfera; provocando en esos periodos geológicos un rápido calentamiento global (Ward, 2006). Según el registro de isótopos de carbono las concentraciones de CO₂ se dispararon antes del comienzo de las extinciones y luego se mantuvieron altas por unos pocos millones de años (Ward, 2006).

Al comienzo del Eoceno hace unos 50 millones de años la temperatura media global posiblemente era de 6 a 7 °C más alta que la actual; al final de Eoceno hace aproximadamente 34 millones de años, el planeta se empezó a enfriar llegando el clima en el Pleistoceno a ser glacial hace 2,6 Ma; luego, en el Holoceno el clima empezó de nuevo a calentarse y se ha mantenido estable desde hace aproximadamente 11.500 años (Goosse *et al.* 2010; Zalasiewicz & Williams 2015).

Como se ha visto en este aparte, tanto la parte estructural como el clima del planeta Tierra ha estado en constante cambio a través de todo lo que se ha logrado determinar y entender de su historia geológica. Todos estos fenómenos de cambio estructural y climático por ser global han influido en el área de estudio. Lo cual se intenta explicar con base en análisis de paleoesfuerzos y curva paleoclimática entre los periodos Eoceno-Pleistoceno.

6. RESULTADOS Y ANALISIS

6.1 Análisis de Paleoesfuerzos en las fases de Orogenia Andina (3Ma) y Fase Final de Ajuste (1Ma) Eoceno-Pleistoceno en la Subcuenca del Río Teusacá

Estación El Hato

Tabla 2. Resumen de los resultados estructurales estación vereda El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm) en la Subcuenca del Río Teusacá.

S1 Estratificación (Promedio n=20)	Litología	F1/H Superficies de Fractura por Corte o Carga y desplazamiento	L1, L2 Fracturas Pareadas Compresivas (Promedio n=20) $\pm 20\%$ Error instrumental 0.5°
14E/54 $\pm 5\%$	Formación Plaeners Falla de Teusacá	349/80 hasta 500 metros o más	Set 1: 249/79, 302/85; L1-L2 Pleistoceno (± 1 MAños) último ajuste Tectónico (Figura 4) Set2: 140/45, 220/45; Eoceno (± 3 MAños) Orogenia Andina
10E/54 $\pm 5\%$	200 Metros al sur: Fm Dura	352/80 500m Aprox. Inferido cartográficamente	Ichnofacies Skolitos 235/65, 290/65

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2, se presentan un resumen de los resultados estructurales de la estación El Hato, camino a la Virgen; en la subcuenca del río Teusacá, al Sur del municipio de La Calera. Se obtuvieron mediciones para dos pares de fracturas, el primer set, es el menos deformado corresponde al último ajuste tectónico del Pleistoceno (± 1 Ma), según Gómez *et al.* (2015), con fracturas de buzamiento muy elevado, casi verticales; se consideran menos deformadas en relación con los planos estratigráficos de mediana inclinación, ya que el esfuerzo normal es inapreciable respecto a los esfuerzos regionales (esfuerzo principal y esfuerzo de cizalla) que actúan paralelos al plano horizontal de referencia. El segundo set es el par de fracturas más deformado y más persistente, corresponde a la Orogenia

Andina en el Eoceno (± 3 Ma) (Forero-Suárez, 1990; Duque-Caro, 1990; Kellogg & Vega, 1995; Taboada *et al.* 2000). Las rocas de la Formación Guadalupe Inferior se predeformaron y se produjeron plegamientos en un estado preconsolidado. A través de estos plegamientos se observa una deformación pseudodúctil en el límite Terciario-Cretácico, acorde con lo expuesto por Helmens & Van der Hammen (1994). La exposición de las rocas y el levantamiento es tan antiguo como la Orogenia Andina. Se observaron Ichnofósiles y una tendencia en dirección suroeste en las trincheras (Figura 4); dichos Ichnofósiles pertenecen al cretácico superior según Guerrero & Sarmiento (1996).



Figura 4. Planos estructurales en la formación Plaeners del Grupo Guadalupe, estación El Hato (coordenadas 1007503N, 1003577E, 3000msnm) en la subcuenca del Río Teusacá. S1: Estratificación. L1, L2: Par de fracturas debidas a esfuerzos de compresión regional. Fuente: Fotografía del Autor de este trabajo.

En la Figura 5; se presentan las grillas estereográficas con los Paleoesfuerzos correspondientes a la estación El Hato subcuenca Río Teusacá. El esfuerzo normal (3 o σ_3), corresponde al esfuerzo dado por la Fuerza de Gravedad y tiene una dirección hacia el centro de la tierra. El plano de esfuerzos principales contiene los esfuerzos horizontales generados por la tectónica de placas. El esfuerzo principal (1 o σ_1) es el esfuerzo mayor y su dirección cambia notablemente entre la fase de Orogenia Andina (Este-Oeste) respecto a la Fase Final de Ajuste (Sur-Norte) (Forero-Suárez, 1990; Duque-Caro, 1990; Kellogg & Vega, 1995; Taboada *et al.*

2000). Probablemente la Subcuenca del Río Teusacá se elevó hace 3 Ma desde un punto a nivel del mar hasta los 2.800 metros, en el proceso de mayor deformación de la Orogenia Andina.

La fortaleza del esfuerzo calculado (data strength) de aproximadamente 0,1Ma; del cual se deduce que ocurrió un acortamiento horizontal aproximado de 28.000 metros. La fortaleza de los esfuerzos viene a ser el vector cónico resultante entre la deformación medida entre los tres esfuerzos; según Anderson (1951) y Cardozo & Almendiger (2013). La Fase Final de Ajuste con tendencia N-S, corresponde al deslizamiento sobre una sutura de fallas en dirección N-S, posiblemente debido a la generación de nuevos planos de debilitamiento del terreno y a cambios en la deformación frágil-dúctil del medio. El esfuerzo secundario (σ_2) durante la Orogenia Andina fue marcadamente N-S, y correspondía al esfuerzo de Corte Directo, esfuerzo de Cizalla o *Shear Stress*. La generación de planos de falla por Cizalla parece haber detenido la acelerada exposición de la Orogenia Andina.

Observados los sets más deformados y los menos deformados de fracturas en la Estación El Hato (Figuras 4 y 5); las fracturas con un mayor buzamiento que se cortan en X y que están menos soldadas o desplazadas y que están menos deformadas, corresponden según Gómez *et al.* (2015) a la Fase Final de Ajuste (1Ma). Las Fracturas rotadas observadas son de menor buzamiento, aparentemente soldadas o selladas, en ocasiones mimetizadas como pseudoclivajes en arcillolitas-liditas silíceas. Estas Fracturas posdeformadas corresponden a la Fase de Orogenia Andina (± 3 Ma) (Forero-Suárez, 1990; Duque-Caro, 1990; Kellogg & Vega, 1995; Taboada *et al.* 2000).

Para el Set 1 (Figura 5), se obtuvo el par 229/75, 288/80 (Dip direction/Dip). Dicho set corresponde al Pleistoceno, último ajuste Tectónico (± 1 Ma) (Gómez *et al.* 2015). El esfuerzo Regional Principal σ_1 (Trend/Plunge) estimado fue de 168/14. El esfuerzo de Cizalla σ_2 estimado fue 77/5 y el esfuerzo Normal estimado σ_3 fue 328/74.

Para el Set 2 (Figura 5), se obtuvo un valor 140/55 y 220/55 (Dip direction/Dip). Dicho set corresponde al Eoceno ($\pm 3\text{Ma}$) en la fase de Orogenia Andina (Forero-Suárez, 1990; Duque-Caro, 1990; Kellogg & Vega, 1995; Taboada *et al.* 2000). El esfuerzo Regional Principal σ_1 estimado (Trend/Plunge) fue 90/42 y el esfuerzo de Cizalla σ_2 fue de 360/0; mientras que, el esfuerzo Normal estimado σ_3 fue 270/47.

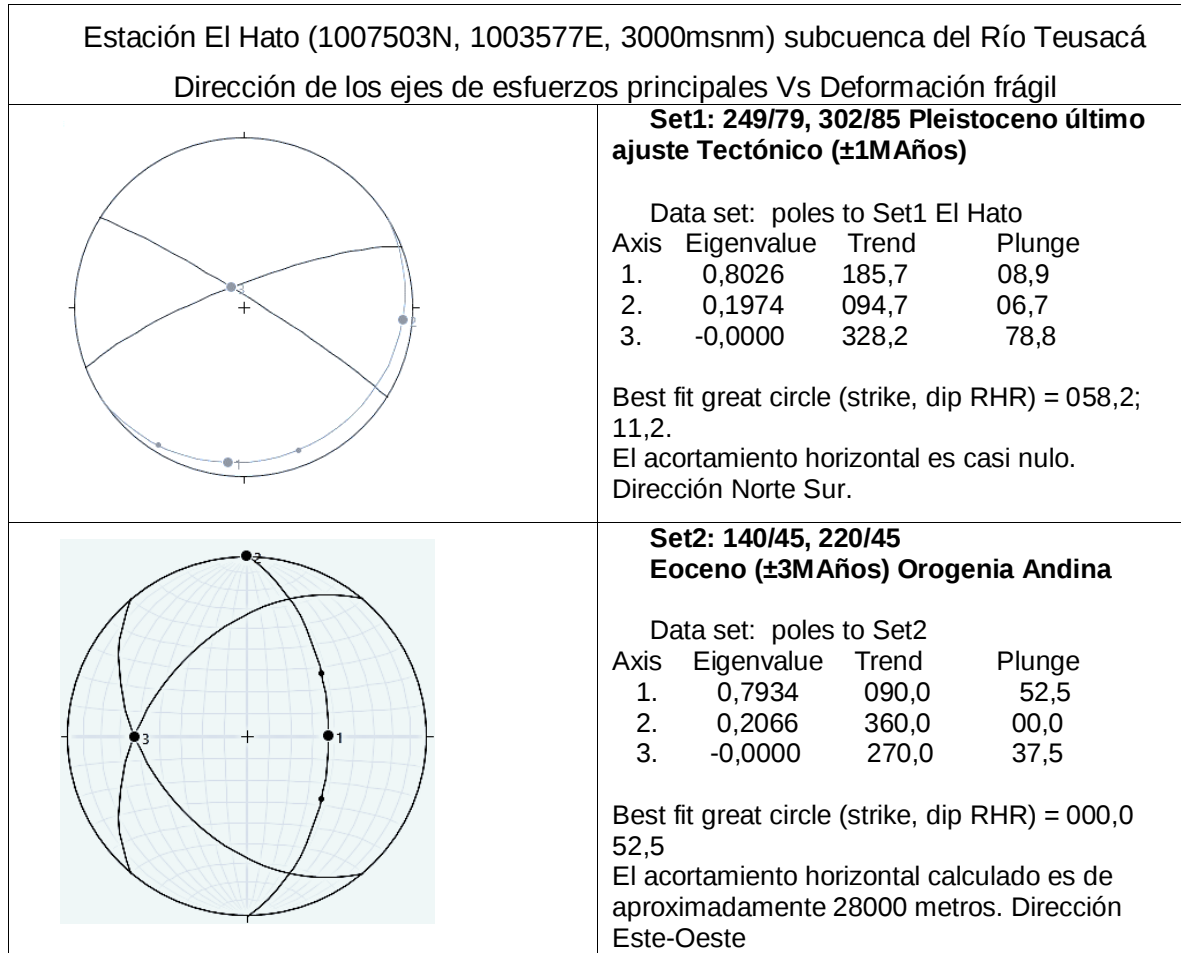


Figura 5. Paleoesfuerzos normales (3) y plano de esfuerzos principales (1 y 2) estación El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm). Fuente: Elaboración propia.

La Estratificación es paralela al eje del Sinclinorio de Teusacá 05E/86 $\pm$ 5%, 10E/86 $\pm$ 5% (Strike, Dip). Sólo fue posible medir datos de estratificación y diaclasamiento en la Formación Dura del Grupo Guadalupe, debido a que las demás rocas no han tenido diagénesis o son materiales friables.

En la Figura 6 se observan los horizontes de suelo (O, A, B, C, D) y espesores aproximados en el tope de la Estación El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm). El Horizonte D corresponde a la Formación Plaeners y el horizonte C a la Formación Marichuela (Oligoceno) producto de la degradación o alteración del grupo Guadalupe.

	Horizonte O: Aprox 1 cm
	Horizonte A: Aprox 10 cm
	Horizonte BW1: Aprox 10 cm
	Horizonte BW2: Aprox 10 cm
	Horizonte C: Aprox 20 cm. Saprolito, roca desintegrada en que no se preservan las estructuras, la biopedoturbación genera una masa Arenosa-Limosa compactada.
	Horizonte D1: 20 cm – En adelante. El Espesor de la Fm. Plaeners es 500metros en el área. Formación Plaeners del Grupo Guadalupe, perteneciente a los inicios del Terciario. Fracturamiento por gelivación 3MA. Orogenia Andina y Periodos Interglaciales.
	Horizonte D2: 20 cm – En adelante. Evento gravimétrico, soliflucción de fragmentos Arcillosos y fragmentos rocosos. Desaparece la estructura de la roca y las fracturas son rellenas de fragmentos líticos de la misma Roca en una matriz arcillosa-arena fina.

Figura 6. Horizontes de suelo y espesores aproximados en el tope de la Estación El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm), Formación Plaeners y Degradación Fm Marichuela (Oligoceno). Fuente: Fotografía del Autor de este trabajo.

Además, en la Figura 4 se observa el mecanismo de deformación frágil sobre la Formación Plaeners, dichas fracturas con espaciamiento centimétrico a decimétrico fueron formadas cuando existió un nivel glacial, lo cual permite conservar estructuras conocidas como plumas de fractura (Figura 7). Dichas estructuras formadas sobre las facetas de fracturamiento de una lidita silicificada muestran los mecanismos de fractura y las direcciones de fracturamiento.

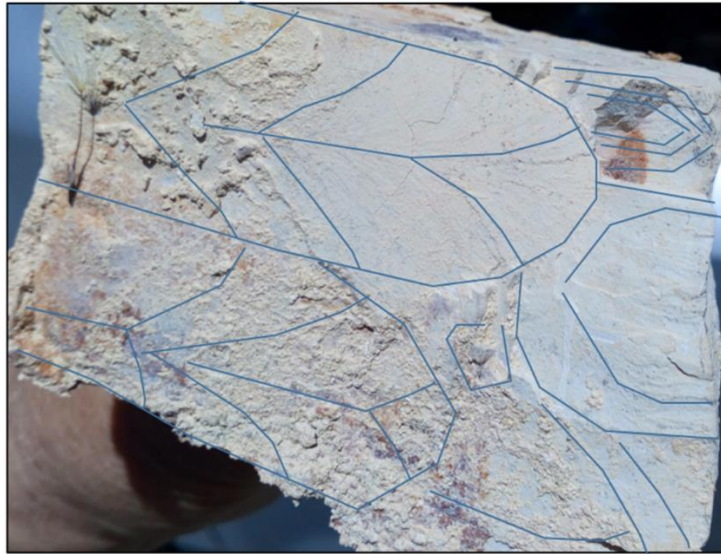


Figura 7. Plumas de agrietamiento por gelivación en la formación Plaeners. Fuente: Fotografía del Autor de este trabajo.

En la Figura 8, en la estación El Hato se observa un contacto fallado entre las formaciones Labor y Planers. Dicho contacto es parte de una estructura de escamamiento grueso que se superpone a lo largo de las fallas Pericos-Teusacá-Santa Elena.



Figura 8. Contacto Fallado (Falla Santa Elena) y replicación Formación Plaeners con la Formación Labor, Estación El Hato (1007503N, 1003577E, 3000msnm). Fractura Pretectónica S1 y Fractura Sintectónica S2. Fuente: Fotografía Autor de este trabajo.

En la Figura 9, se observa la plantilla estereográfica con los datos calculados para paleoesfuerzos, y la relación deslizante entre la estratificación que tiende a verticalizarse y el plano de falla que es casi vertical. En esta figura los dos sets de fracturas se han consolidado en uno solo y se obtiene un trend para el esfuerzo principal σ_1 de 170° y un plunge de 20° . Al rotar σ_3 y llevarlo al zenith (0,0), se obtiene que el plano de esfuerzos principales coincide con el plunge y el trend de la Falla Teusacá. Se considera que las Fallas de Teusacá, de Bogotá y de Pericos son una paleoestructura heredada de la Orogenia Andina de hace ± 3 Ma (Forero-Suárez, 1990; Duque-Caro, 1990; Kellogg & Vega, 1995; Taboada *et al.* 2000).

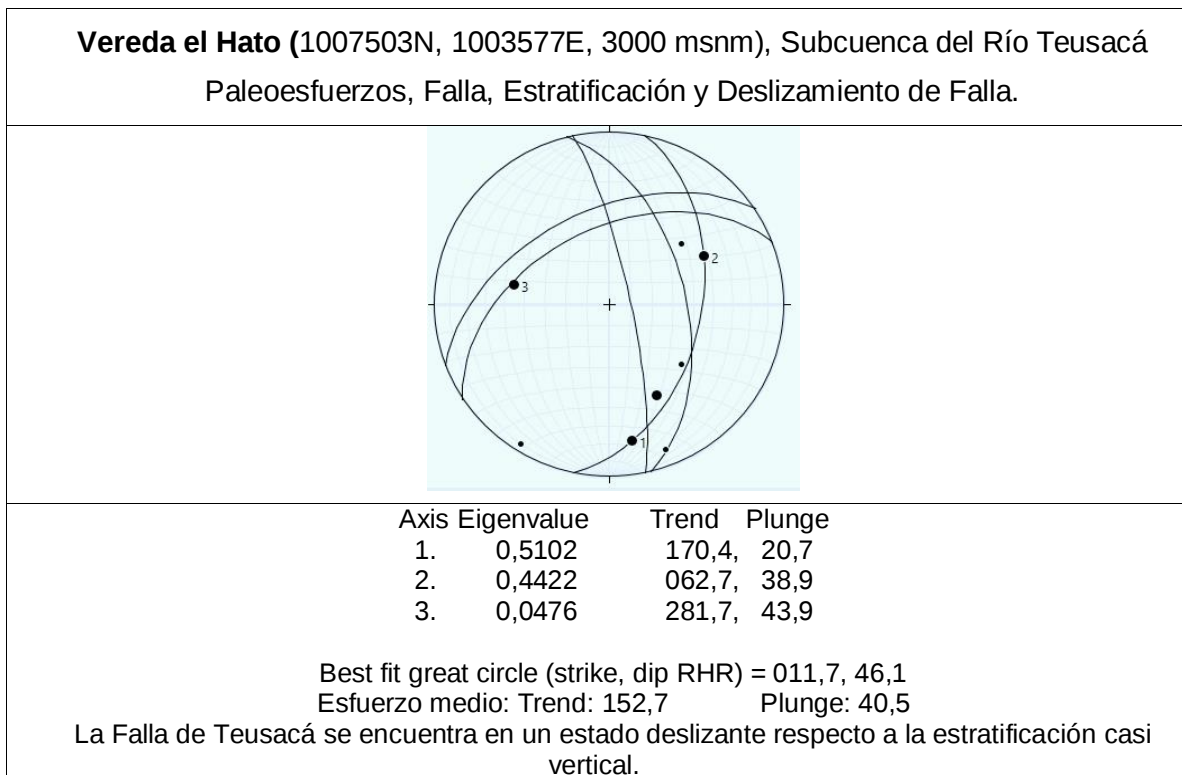


Figura 9. Paleoesfuerzos, falla, estratificación y deslizamiento de falla en la estación vereda El Hato 1007503N, 1003577E, 3000 msnm. Fuente: Elaboración Propia

Estación Restaurante La Mazorca

El Plano de la Falla de Teusacá medido en el punto La Mazorca, en la orilla oriental del río Teusacá (Figura 10), sobre un afloramiento vertical de unos 300 a

500 metros, es de 349/80 (Dip direction/Dip). Las slickenlines tienen una vergencia W en el flanco Este del Sinclinorio de Teusacá. La Ichnofacies Skolitos aparece en toda la arenisca dura se observan tendencias en varias direcciones 235/65, 290/65.



Figura 10. Fracturas Pretectónicas S2 y Sintectónicas S1 observada sobre rocas aflorantes costado oriental Rio Teusacá, Estación Restaurante La Mazorca 1008643N, 1007978E, 2895msnm. Fuente: Fotografía Autor de este trabajo.

Estación A cerca de Kurnik

En la Figura 11, se observan materiales de la formación Cacho, depositados en disconformidad sobre la formación Guaduas. En este punto, la Falla de Teusacá se encuentra cubierta por arcillolitas friables de la Formación Guaduas que generan escarpes menos pronunciados y laderas menos inclinadas. Los datos estructurales se muestran en la Tabla 3.



Figura 11. Falla de Teusacá y pares de fracturas Pre y Sintectónicas. Costado oeste viaducto Bogotá-La Calera cerca de Kurnik-Puente y Box Culvert (1009078N, 1008635E, 2815msnm). Fuente: Fotografía Autor de este trabajo.

En la Tabla 3; se presentan los resultados obtenidos bajo el Box Culvert costado occidental viaducto Bogotá-La Calera, cerca del restaurante Kurnik (1009078N, 1008635E, 2815msnm).

Tabla 3. Datos Estructurales tomados costado occidental viaducto Bogotá-La Calera, Estación A cerca del restaurante Kurnik-Puente y Box Culvert (1009078N, 1008635E), 2815msnm sobre Río Teusacá.

L1 Estratificación	Litología	S1/H Superficies de Fractura por Corte o Carga y desplazamiento	Paleocorriente (n = 5)
55E/35	Grupo Guadalupe/ Formación Cacho	360/90 Inferido	Imbricación Paleocorriente: 360/55
60E/20		360/90 Inferido	N.A.

Fuente: Elaboración propia

Estación B cerca de Kurnik



Figura 12. Estación B Kurnik-Puente y Box (1009078N, 1008635E, 2895msnm). Pares de Fracturas Pre y Sin Tectónicas en la Formación Labor del Grupo Guadalupe. Fuente: Fotografía del Autor de este trabajo.

En la Figura 12 se observan dos pares de fracturas (set 1 y set 2) pretectónicas Eoceno y sintectónicas. Las fracturas pretectónicas corresponden al inicio de la Orogenia Andina en el Eoceno y las fracturas sintectónicas corresponden al Pleistoceno (Julivert, 1963; Forero-Suarez 1990). Los datos estructurales obtenidos se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos Estructurales tomados costado oriental viaducto Bogotá-La Calera, Estación B cerca del restaurante Kurnik-Puente y Box Culvert (1009078N, 1008635E), 2815msnm sobre Río Teusacá.

L1 Estratificación (Promedio n=150 Datos)	Litología	S1/H Superficies de Fractura por Corte o Carga y desplazamiento	L1, L2 Fracturas Pareadas Compresivas (Promedio n=150 datos) $\pm 20\%$ Error instrumental es de 0.5°.
14E/75 $\pm 5\%$	Contacto Formación Dura/Forma ción Labor	350/85 hasta 500metros o más	Set1: 245/75, 300/75 Pleistoceno último ajuste Tectónico (± 1 MAños) Set2: 140/45, 220/45 Eoceno (± 3 MAños) Orogenia Andina
25E/85 $\pm 5\%$		345/85 500m Aprox. Inferido cartográficamente	Ichnofacies Skolitos 235/65, 290/65 110/25, 180/35

Fuente: Elaboración Propia.

Estación Kurnik-Parque Extremo

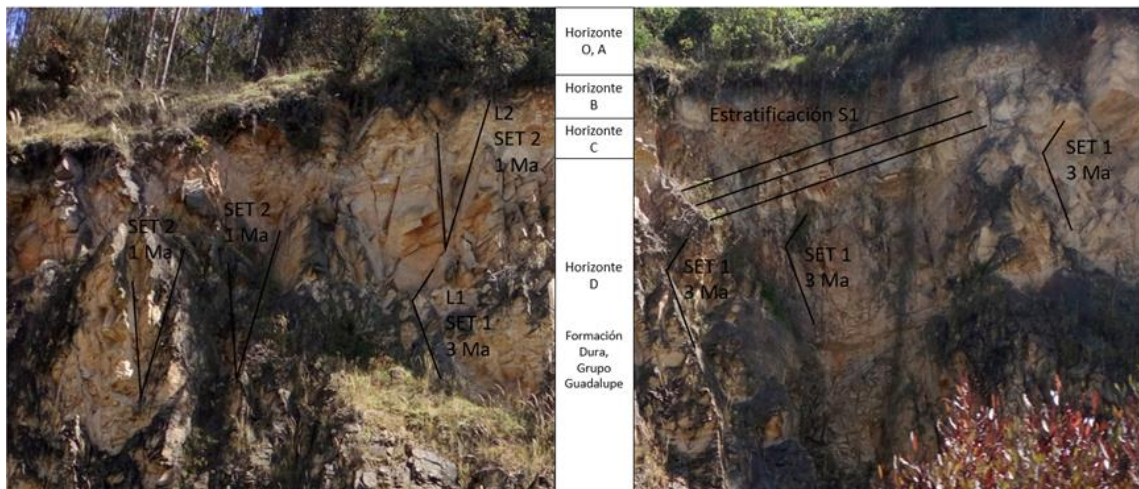


Figura 13. Fracturas aparentes Pretectónicas S1 y Sintectónicas S2 en la Estación Kurnik-Parque Extremo (1009196N, 1008799E, 2819msnm). Fuente: Fotografías del Autor de este trabajo.

En la Figura 13, se observan fracturas pretectónicas y sintectónicas en el flanco NW de la falla de Teusacá, sobre la formación Dura. Se observa escamamiento grueso por la falla de Teusacá repitiéndose la secuencia Guadalupe Superior y Grupo Guaduas. Los datos estratigráficos se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos estructurales estación Kurnik-Parque Extremo (1009196N, 1008799E, 2819msnm).

L1 Estratificación (Promedio n=85)	Litología	S1/H Slickenlines sobre el plano de Estratificación. El Plano de Estratificación es la misma superficie de falla.	S1, S2 Fracturas Pareadas Compresivas (Promedio n=85 datos) $\pm 20\%$ Error instrumental 0.5° .
05E/86 $\pm 5\%$	Formación Dura	349/80 hasta 500metros.	Set1: 229/75, 288/80 Pleistoceno último ajuste Tectónico (± 1 MAños) Set2: 140/55, 220/55 Eoceno (± 3 MAños) Orogenia Andina
10E/86 $\pm 5\%$		352/80 500m Aprox.	Ichnofacies Skolitos 235/65, 290/65

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5, se presentan los datos correspondientes a la estación Kurnik-Parque Extremo, aproximadamente a 2 kilómetros al Sur de casco urbano del Municipio de La Calera, donde se observa un afloramiento de capas del Guadalupe Inferior (Formación Labor), sobre el plano de Estratificación están marcados los slickenlines lo que hace suponer que es el punto estratigráfico del detachment de la falla de Teusacá. Se observa, que al medir de sets de fracturas arrojan paleoesfuerzos similares a lo encontrado en la estación El Hato, lo cual sugiere que corresponde a esfuerzos regionales.

En la Figura 14 se elabora una grilla estratigráfica para calcular el plano de intersección de los set pretectónico y sintectónico. Para el Set 2 (Eoceno) se tiene un eje de esfuerzos principales 90/42 (Trend/Plunge). Para el Set 1 (Pleistoceno) se calcula un eje de esfuerzos principales 168/14.

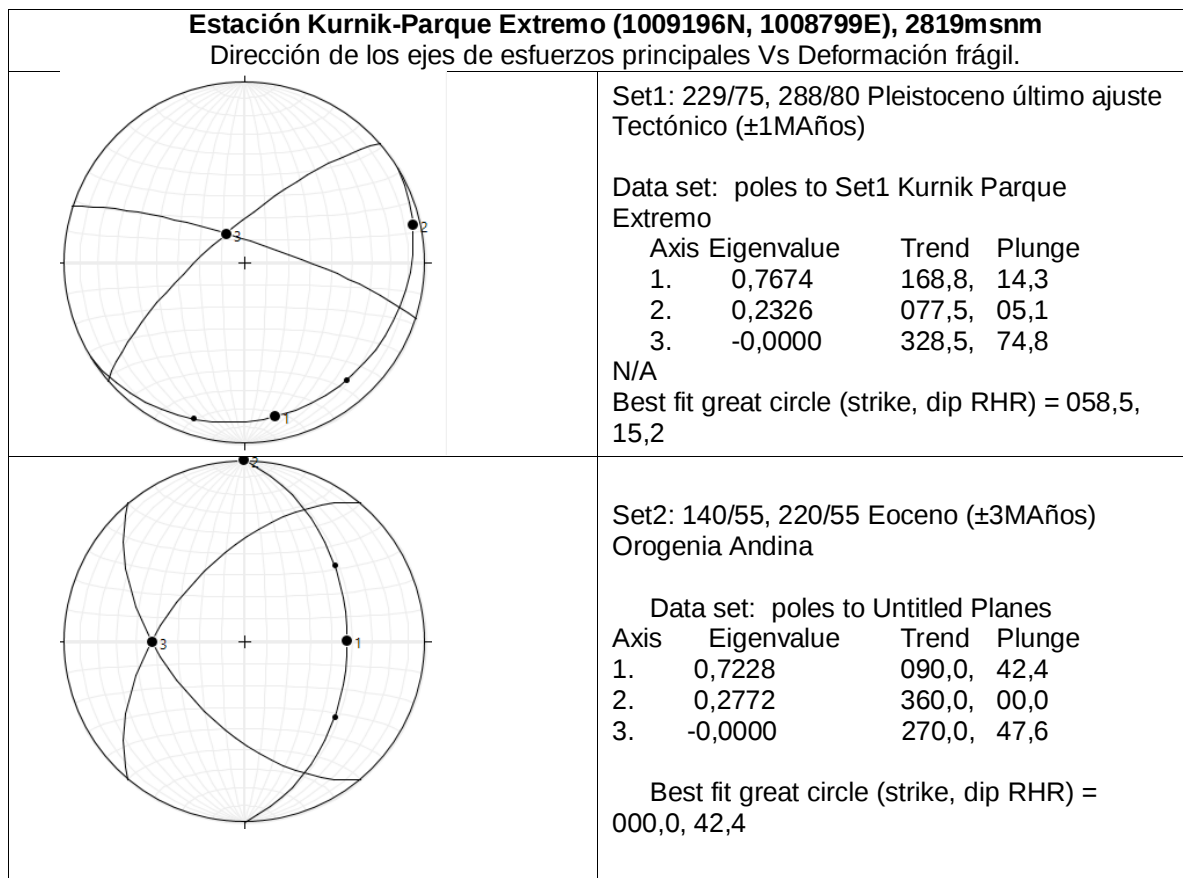


Figura 14. Dirección de los esfuerzos principales Vs Deformación frágil en la estación Kurnik-Parque Extremo. Fuente: Elaboración propia.

Estación La Cabaña

En la Tabla 6; se presentan los datos de la Estación La Cabaña sobre el Grupo Sabana del Cuaternario, el tope de la unidad corresponde a 10.000 años de antigüedad. Pequeñas gravas producto de la desintegración de la formación Cacho se presentan como lentes cuando se pueden observar paleocanales del río Teusacá.

Tabla 6. Datos estructurales estación La Cabaña sobre el río Teusacá (1013446N, 1019830E), 2584msnm

L1 Estratificación (Promedio n=35 Datos)	Litología	S1/H Superficies de Fractura por Corte o Carga y desplazamiento	Imbricación en gravas
12E/5±5%	QSNS	N.D.	Es un lugar para observar los depósitos verdosos de ceniza volcánica del último evento (5 erupciones sucesivas en los últimos 10.000 años)
10E/5±5%	QSNS lente gravas límite	N.D.	Imbricación aparente 295/05

Fuente: Elaboración Propia.

Los eventos glaciares más importantes, cuando el nivel inferior de la capa de hielo se situó bajo los 2.800 msnm fueron el Estadial de Tagua y el Estadial de Carrizal (34000 años y 42500 años) (Julivert, 1963; Forero-Suarez 1990). Estos eventos que corresponden Winsconsiniano posiblemente modelaron facetas triangulares en los cerros orientales de Bogotá; en la Subcuenca del Río Teusacá, un extenso valle en U es también prueba de que se alojó una capa de hielo de más de 1.000 metros de espesor en este periodo.

En este punto, se realizó un estimativo para la sedimentación aproximada del Río Teusacá, como sigue:

$$Tasa\ de\ Sedimentación\ S.\ Río\ Teusaca = \frac{Espesor\ Fm\ Sabana + Espesor\ Fm\ Subachoque}{3.5e6\ años}$$

$$Tasa\ de\ Sedimentación\ S.\ Río\ Teusacá = \frac{320m + 150m}{3.5e6\ años} + 0\ (factor\ diagenético)$$

$$Tasa\ de\ Sedimentación\ S.\ R\acute{o}\ Teusac\acute{a} = \frac{1,343mm}{a\tilde{n}o}$$

Por consiguiente, la tasa de sedimentaci3n general aproximada del R3o Teusac3 se estim3 en aproximadamente 1,3 mm/a3o.

Por 3ltimo, con base en los an3lisis geol3gicos anteriores se construy3 un mapa Geol3gico ortocorregido de la Subcuenca del R3o Teusac3 (Figura 15). N3tese que el modelo de Ventana Estructural Inversa presenta un retrohorst en el n3cleo del sinclinorio de Teusac3, y aparece el cuaternario aflorando en medio de la Formaci3n Tierna y la Formaci3n Guaduas.

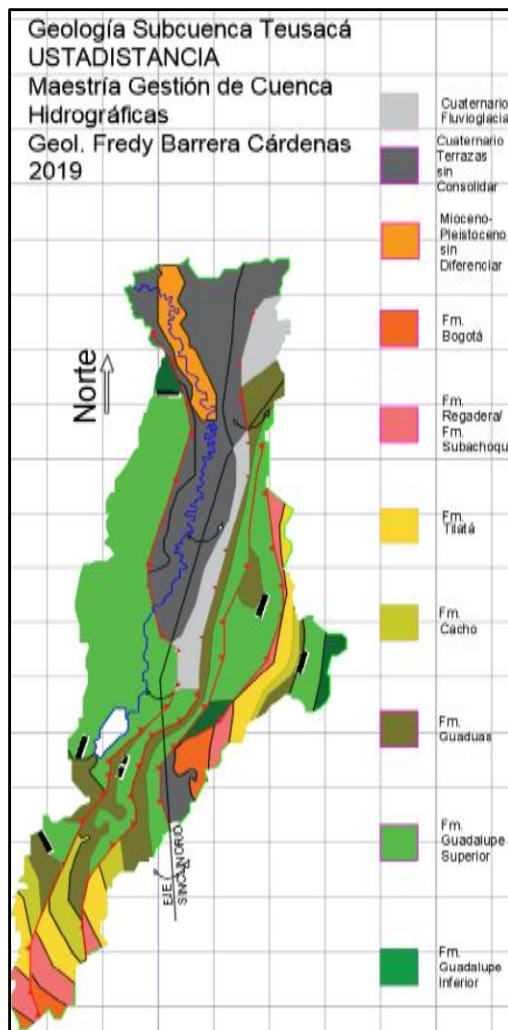


Figura 15. Mapa Geol3gico Ortocorregido Subcuenca del R3o Teusac3. Fuente: Elaboraci3n propia.

En la subcuenca del Río Teusacá en la secuencia cuaternaria-plioceno aproximadamente un 63% de las rocas presentes son de edad plioceno-cuaternario, un 15% terciario medio e inferior y el 22% restante son de edad cretácica según lo obtenido de la elaboración del mapa elaborado en el presente trabajo y datos obtenidos por el programa Arc-Gis (Figura 15).

La Figura 16, muestra un perfil de corte entre el Páramo de Chingaza hasta el Norte de Bogotá, pasando la transecta sobre el Municipio de La Calera. Se observa la estructura de abanico imbricado, es decir el thrust tiene un detachment común para las Fallas de Teusacá, Pericos, Santa Elena, San Lorenzo, Salitre y Bogotá. Dicho punto de despegue o detachment se encuentra entre el Guadalupe Inferior y el Guadalupe Superior a unos 2500 metros de profundidad; el despegue sobre la Formación Labor se puede observar a unos 3 kilómetros al Norte del Municipio de La Calera.

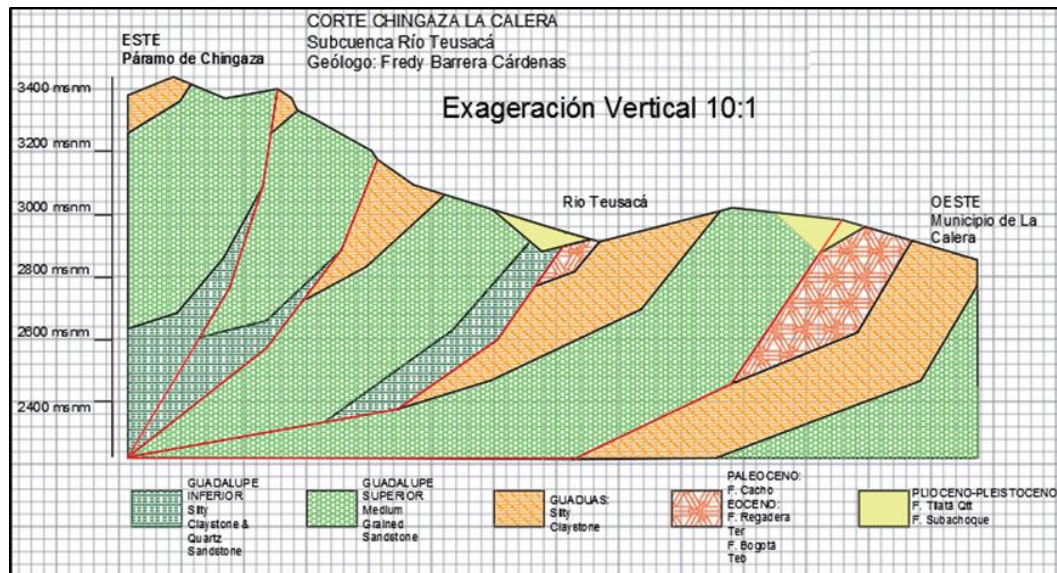


Figura 16. Corte Páramo de Chingaza - La Calera. Fuente: Elaboración propia.

6.2. Interpretación de la tendencia paleoambiental Eoceno-Pleistoceno de la Subcuenca del Río Teusacá.

Con base en los datos de los últimos ciclos glaciales en la Cordillera Oriental recopilados de Adriessen *et al.* (1993), IGAC (2000) y Harland *et al.* (1989) (Tabla 1), se realizó la estimación de la curva paleoclimática y paleoambiental en los últimos 2.5 Millones de Años para el bosque Andino. Siguiendo el método algebraico simplex (Graveolis *et al.* 2013), expuesto en la sección marco metodológico; se construyeron las siguientes expresiones algebraicas para estimar altitud a la cual se encontraba el bosque Andino y determinar la tendencia de la curva Paleambiental en el área de estudio:

$$y = X_{min} * e^{nx} \therefore y > 2361.5msnm$$

Tal que:

$$\ln y = \frac{y_1 + y_2}{2} : y_1 = \ln x_{med} - \ln x_{min}; y_2 = \ln x_{med} - \ln x_{max} \therefore 302.06m$$

$$> y - y_{med} > 77.67m$$

$$[y = X_{med} \pm \Delta x \therefore X_{med} \simeq 2580.5msnm]$$

$$y = ax^2 + X_{max} + c \therefore y < 3161.2msnm$$

Dónde: X_{med} es la media aritmética del límite superior del Bosque Andino, X_{max} y X_{min} son las tangenciales a cada curva. El número n es el número de datos de i a j . El factor Δx es la pendiente de la tangente que pasa por un punto de la curva en un momento de tiempo (x) determinado.

De otra parte se elabora una expresión en el marco del modelo algebraico general que es la siguiente:

$$y > 2361.5msnm$$

Tal que:

$$302.06\text{metros} > y - y_{med} > 77.67\text{metros}$$

$$X_{med} \simeq (2580.5msnm * \Delta x) / \Delta y \therefore Y_{med} = 2580.5msnm$$

$$y < 3161.2 \text{msnm}$$

Donde y es la altura del bosque andino en un determinado tiempo (x), X_{med} es la edad en años en un momento en que la curva es $Y_{med} = 2580.5 \text{msnm}$, en la curva presentada en la Figura 17, la curva tiene 7 datos iguales a Y_{med} .

Para dicha expresión se asociaron ecuaciones lineales que describen la forma de la curva:

$$y = X_{min} * e^{nx}$$

Tal que:

$$\ln y = \frac{y_1 + y_2}{2}, y_1 = \ln x_{med} - \ln x_{min}; y_2 = \ln x_{med} - \ln x_{max}$$

$$y = X_{med} \pm \Delta x$$

$$y = ax^2 + X_{max} + c$$

Las ecuaciones anteriores corresponden a los análisis lineales sobre las curvas y los segmentos de curva. Todas las ecuaciones corresponden a aproximaciones lineales a las operaciones y a identidades trigonométricas.

Es de anotar, que la cantidad de soluciones es infinita y debe ser calculada para cada ejemplo, por lo tanto debe suministrarse un modelo para cada diferente caso. Por Ejemplo; si se quiere saber la máxima altura del bosque andino para un pronóstico (forecasting), y se proyecta a 10 mil años se debe elaborar un número o muestra de ensayos diferentes con $X_{med} - X = 10000$. Los modelos de pronóstico o forecasting hacen parte de los modelos Algebraicos “nunca resueltos” debido a la complejidad de sus cálculos que llevarían un tiempo infinito en resolverse.

En la Figura 17, se presenta una curva Paleoambiental en la cual se graficó la altitud máxima del Bosque Andino para los últimos 2.5 Millones de Años.

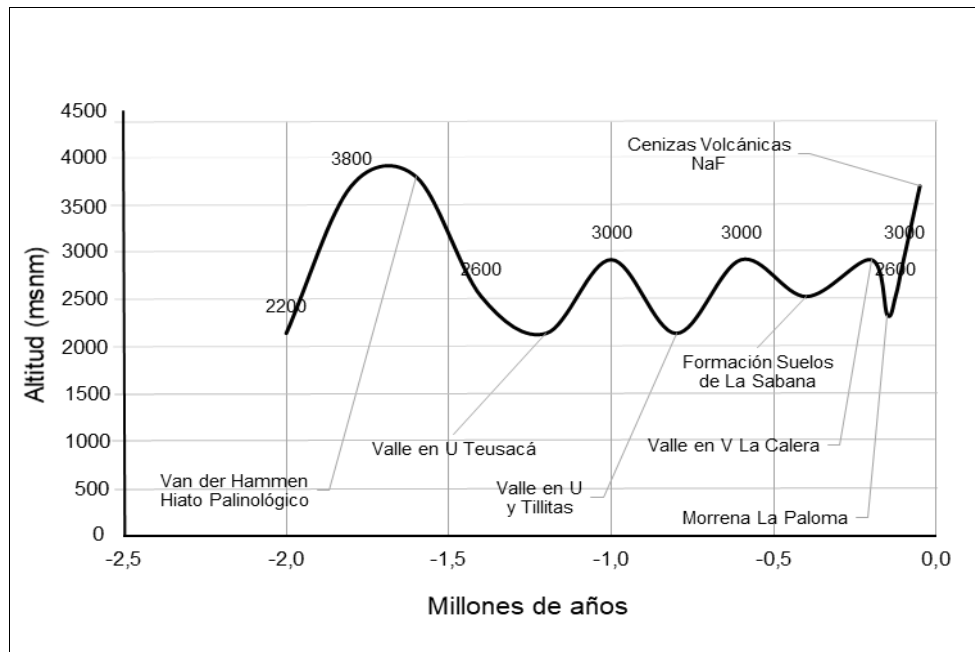


Figura 17. Curva Paleoambiental aproximada en el área de la Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración propia.

Con base en los datos de los últimos ciclos glaciales en la Cordillera Oriental recopilados de Adriessen *et al.* (1993), IGAC (2000) y Harland *et al.* (1989) (Tabla 1); se realizó la estimación de las líneas de tendencias de la curva paleoclimática y paleoambiental para el bosque Andino hace aproximadamente 126.000 años.

La Tabla 7, muestra un resumen de los resultados de las estimaciones de las diferentes líneas tendencias y su aproximación de una curva Paleoclimática-Paleoambiental; en la cual, se observa la relación de la dispersión R^2 entre los datos y la curva. Las curvas de tendencia más aproximadas son: la exponencial ($R^2 = 0,0377$) y la logarítmica ($R^2 = 0,0431$). La línea de tendencia exponencial demuestra que existe una oscilación exponencial alrededor de un nivel tangencial basal de 2361,5 msnm. La línea de tendencia logarítmica demuestra que los cambios cada cierto periodo de tiempo (10, 100, 1000, 10000, 100000 hasta 1 Millón de años), oscilan entre los 77.67 metros a los 302.06 metros. La línea de tendencia lineal demuestra la altitud media del límite superior del Bosque Andino y el límite inferior del Páramo en el área de estudio es 2580.5 msnm, y tiene un gradiente de 0.0105. La línea de tendencia polinómica o cuadrática demuestra que cuando alcanza el

nivel máximo de 3161 msnm el nivel de Bosque Andino descenderá 2 centímetros cada año. La curva es ligeramente positiva y muestra un incremento positivo en la temperatura respecto al nivel actual al clima de hace 2.5 millones de años.

Tabla 7. Resumen de los resultados de las estimaciones de las diferentes líneas tendencias y su aproximación para la obtención de una curva paleoclimática-paleoambiental en el área de estudio.

Tendencia	Resultados
Dispersión Lineal	$y = 0.0105x + 2580.5$ $R^2 = 0.0918$ Aproximación débil: La altitud media del límite superior del Bosque Andino/ límite inferior del Páramo en el área de estudio es de aproximadamente 2580.5 msnm.
Exponencial	$y = 2361.5e^{0.00003x}$ $R^2 = 0.0377$ Aproximación muy fuerte: Oscilación exponencial alrededor de un nivel tangencial basal de aproximadamente 2361.5 msnm.
Polinómica	$y = 0.000002x^2 - 0.0198x + 3161.2$ $R^2 = 0.1409$ Aproximación muy débil: Cuando alcanza el nivel máximo de 3161 msnm el nivel de Bosque Andino descenderá 2 centímetros cada año.
Logarítmica	$y = 302.06\ln(x) - 77.67$ $R^2 = 0.0431$ Aproximación fuerte: Los cambios cada 10, 100, 1000, 10000, 100000 hasta 1Millón de Años.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 18, muestra una curva paleoclimática, paleoambiental y paleobatimétrica, límite de la capa glacial, límite páramo-bosque andino y línea paleobatimétrica aproximada para los últimos 140000 años. Los eventos Glaciales más importantes son el Estadial de Tagua (34500 años), el Estadial de Carrizal (42500 años), el Estadial de Tres Esquinas (88000 años) y el Estadial de La Isla (112000 años) (Adriessen *et al.* 1993), IGAC (2000) y Harland *et al.* (1989).

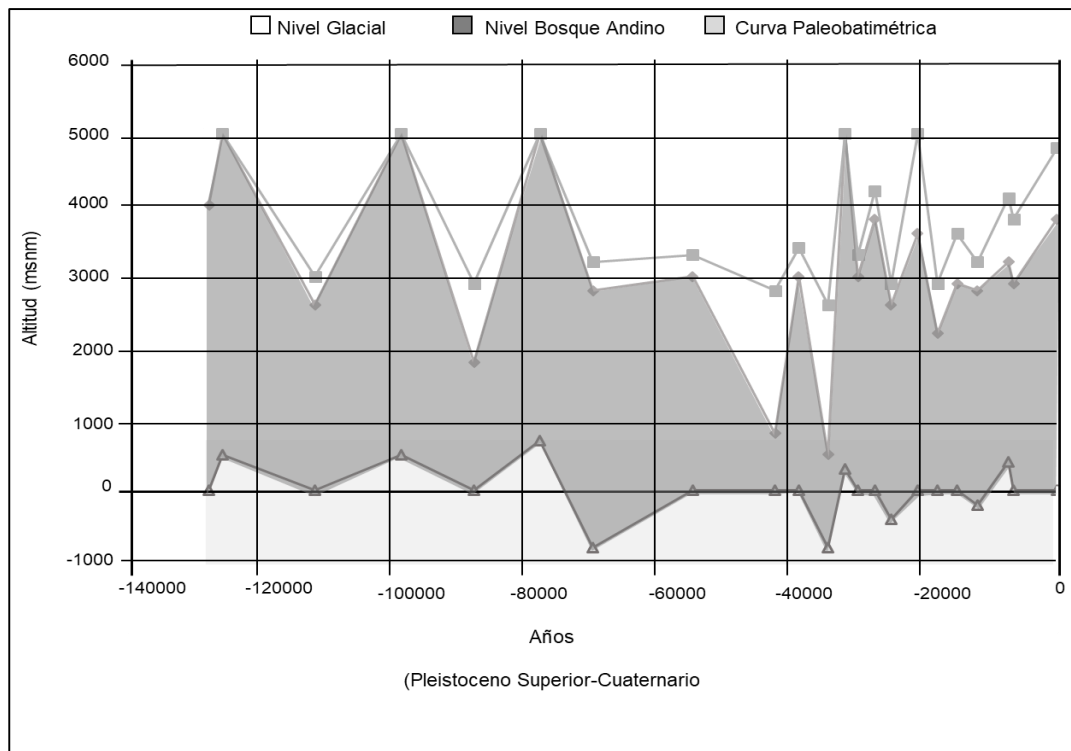


Figura 18. Curva paleoambiental y paleobatimétrica, límite de la capa glacial, límite páramo-bosque andino y curva paleobatimétrica aproximada en los últimos 126.000 años en la cordillera oriental de Colombia. Fuente: Elaboración propia.

La observación de estas paleocaracterísticas son congruentes con otros modelos de paleoformación y régimen paleohidromorfológico, como el reportado por Loaiza *et al.* (2017) para el caso de los suelos andinos.

Se generan dos líneas diferentes con la finalidad de comparar la incidencia de la actividad antrópica en la curva paleoambiental. En la Tabla 8, se presenta una serie de tendencias de la curva tope de Bosque Andino sin actividad Antrópica frente a la misma curva incluyendo el Cuaternario. Dichas curvas son modeladas y los datos se presentan en la Tabla 9, en donde se muestran las aproximaciones lineales a la curva de Bosque Andino en el periodo Plioceno-Holoceno y en la Tabla 10, se exponen los resultados de las aproximaciones lineales a la curva de Bosque Andino en el periodo Plioceno-Pleistoceno (Sin Cuaternario).

Tabla 8. Comparación líneas Bosque Andino en curvas Plioceno-Holoceno y curva Plioceno-Pleistoceno (Sin Cuaternario).

Tipo de tendencia	Periodo/Altitud	
Límite Superior del Bosque Andino (Actual Aprox: 3800 a 4000 msnm)	Plioceno-Holoceno	Plioceno-Pleistoceno (Sin Cuaternario)
Maxima Tendencia Lineal	3011.0 msnm	3125.6 msnm
Media Tendencia Lineal	2845.6 msnm	2580.0 msnm
Minima Tendencia Lineal	2824.0 msnm	2362.6 msnm

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Aproximaciones lineales a la curva de Bosque Andino en el periodo Plioceno-Holoceno.

Periodo	Resultados de líneas de tendencia
Plio-Holoceno Maxima Lineal	$y = 375.51x^2 + 670.42x + 3011.3$ tal que XMAX=3011.3
Plio-Holoceno Media Lineal	$y = -40.366x + 2845.6$ tal que XMED=2845.6
Plio-Holoceno Mínima Lineal	$y = 2824e^{0.0001x}$ tal que XMIN=2842

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Aproximaciones lineales a la curva de Bosque Andino en el periodo Plioceno-Pleistoceno (Sin Cuaternario).

Periodo	Resultados de líneas de tendencia
Plio-Pleistoceno Sin Cuaternario Máxima Lineal	$y = 0.000002x^2 - 0.0198x + 3161.2$ tal que XMAX=3161.2
Plio-Pleistoceno Sin Cuaternario Media Lineal	$y = 0.0105x + 2580.5$ tal que XMED=2580.5
Plio-Pleistoceno Sin Cuaternario Mínima Lineal	$y = 2361.5e^{0.00003x}$ tal que XMIN=2361.5
Plio-Pleistoceno Ciclos de aproximación a la Media Lineal	$y = 302.06\ln(x) - 77.67$ tal que $77.67 < X - XMED < 302.06$

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 19 se presentan cuatro curvas que comparten las mismas tendencias lineales y los mismos mínimos y máximos. Una de ella tiene datos reales de picos que se obtienen de la Tabla 1. Las otras tres curvas tienen datos incompletos o información perdida. Las tres curvas simuladas a partir de la curva conocida, a una

de ellas no se le suministran datos de picos sino solamente es una línea de puntos medios. Posteriormente en la simulación se le aplican los datos obtenidos de las tendencias lineales y es una curva de fragmentos de líneas. Finalmente se obtiene una simulación que le da más peso a los datos de tendencias.

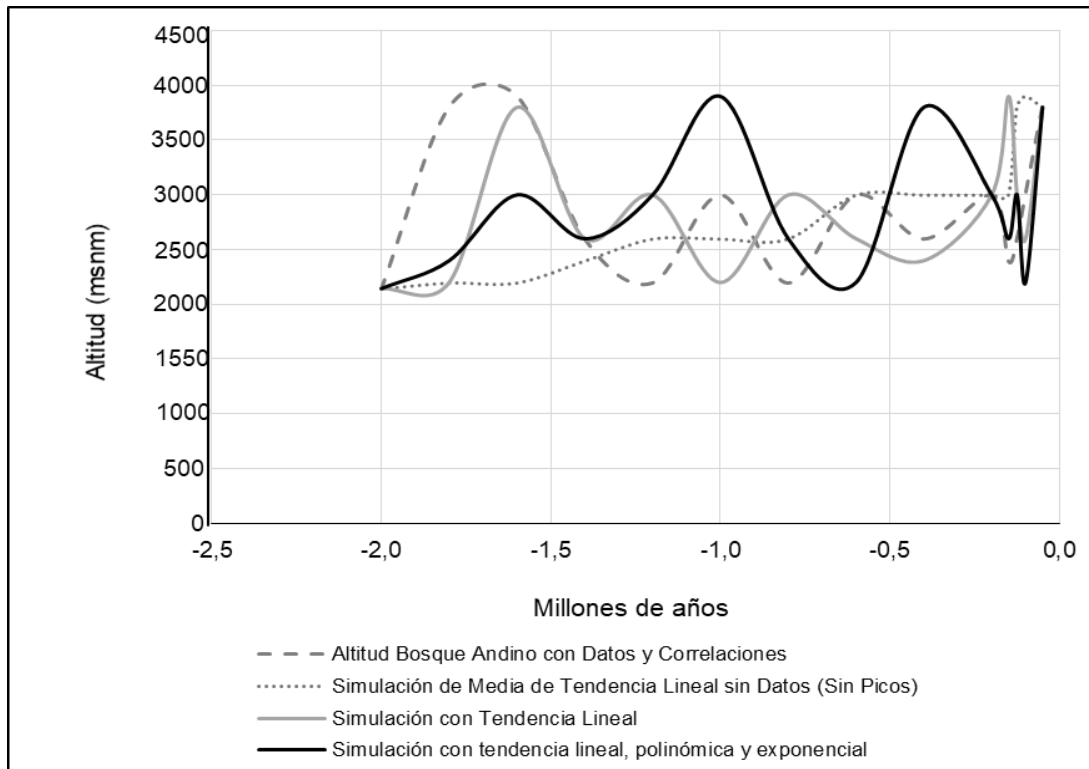


Figura 19. Simulaciones con el algoritmo Simplex de la curva paleo-ambiental Plioceno-Holoceno en el área de la Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11, se presentan las ecuaciones de la tendencia polinómica, pendiente, tendencia exponencial y picos de la curva del Bosque Andino en el periodo Plioceno-Holoceno. En la Tabla 12 se presentan las ecuaciones de las líneas de tendencia polinómica, pendiente, tendencia exponencial y del análisis de valles de la curva del Bosque Andino en el periodo Plioceno-Pleistoceno.

Los datos de las tendencias, mínimos y máximos y de las curvas de tendencia se emplean para realimentar el modelo, generando simulaciones diferentes. Todas las simulaciones corresponden al mismo modelo simplex inicial y son suposiciones que se adaptan con lo que se conoce de la curva paleoambiental y su

comportamiento.

Tabla 11. Simulación tendencia polinómica, pendiente, exponencial y picos de la curva del Bosque Andino en el periodo Plioceno-Holoceno.

Resultados	Explicación
$y = 375.51x^2 + 670.42x + 3011.3$	Un bosque situado a 3011.3 msnm tiende a ganar 670 metros de altitud muy velozmente.
$y = -40.366x + 2845.6$	El bosque Andino es más estable a 2845.6 msnm con una tendencia a perder 40 metros cada año.
$y = 2824e^{0.0001x}$	Al alcanzar un tope mínimo de 2824 msnm el bosque andino se recuperará exponencialmente.
4 Picos de 3800, 3600 y 3000 msnm	Cada 500.000 años se alcanza un tope máximo o hito en el Bosque Andino, estos ciclos prolongados están separados por valles relativamente estrechos por debajo de los 2400 msnm.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Simulación tendencia polinómica, pendiente, exponencial y análisis de valles de la curva del Bosque Andino en el periodo Plioceno-Pleistoceno sin Cuaternario.

Resultados	Explicación
$y = 2 \cdot 10^{-6}x^2 - 0.0198x + 3161.2$	Un bosque situado a 3161.2 msnm tiende a perder 2 centímetros de altitud muy lentamente.
$y = 0.0105x + 2580.5$	Un bosque Andino es muy estable a 2580.5 msnm.
$y = 2361.5e^{0.00003x}$	Al alcanzar un tope mínimo de 2361.5 msnm el bosque andino se recuperará exponencialmente
$77.67 < X-XMED < 302.06$	Cuando la altitud del bosque andino tiende a separarse de la media (2580.5 msnm) lo hace por ciclos de 77.67 metros, pero si tiende a acercarse a la media lo hace por ciclos de 302.06 metros con tendencia logarítmica

Fuente: Elaboración propia.

Una vez elaborado el modelo con las líneas de tendencia y toda la información obtenida, se procede a hacer simulaciones. En la Figura 20 se contrastan los dos modelos: Plioceno-Pleistoceno sin actividad antrópica, Plioceno-Holoceno con actividad antrópica y el modelo inicial alimentado por datos obtenidos instrumentalmente y observaciones de campo. Las simulaciones tienen un peso importante en las tendencias lineales de la curva y menos en los datos de picos, que sin embargo también son teóricos, obtenidos por medios observacionales.

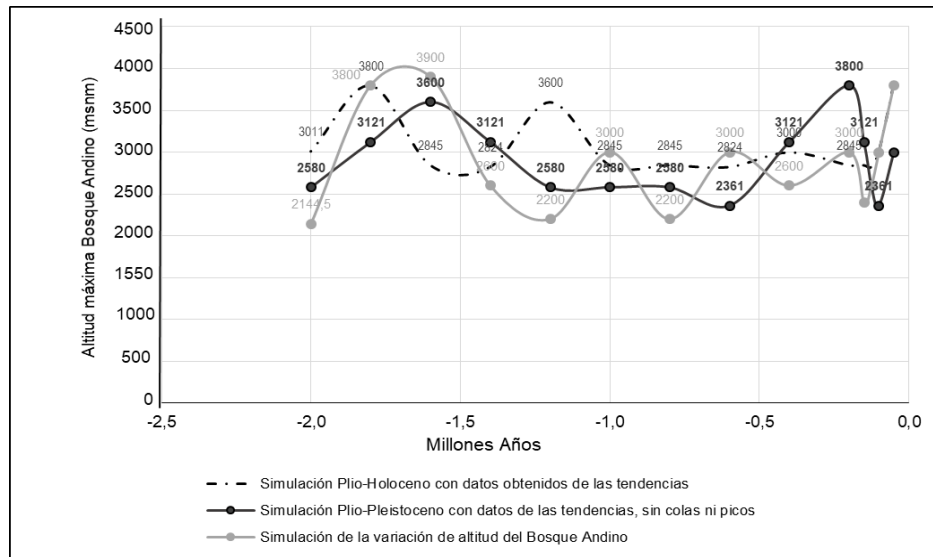


Figura 20. Contraste de la simulación de las tendencias Plioceno-Holoceno sin actividad antrópica, Plioceno-Holoceno con actividad antrópica y Plioceno-Holoceno obtenida con datos de los últimos ciclos glaciales en la Cordillera Oriental recopilados por Adriessen et al. (1993), IGAC (2000) y Harland et al. (1989) (Tabla 1). Fuente: Elaboración propia.

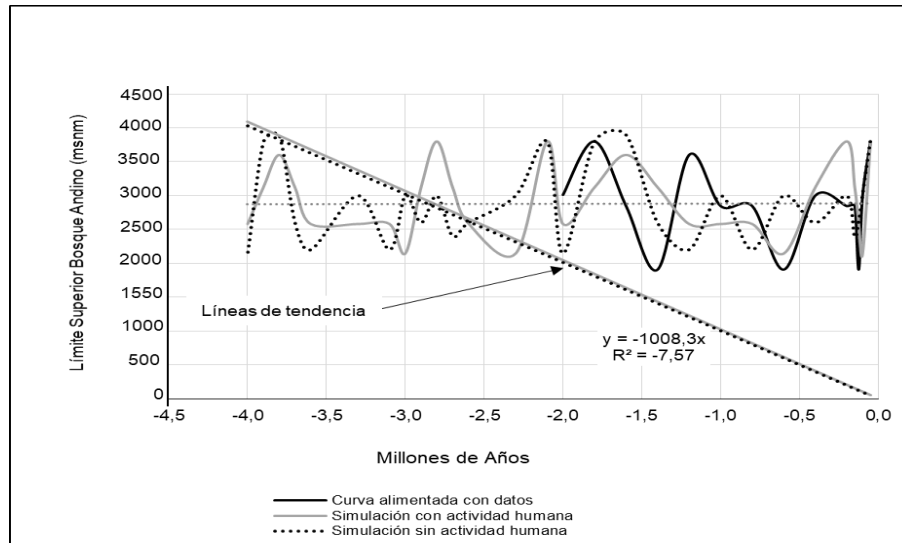


Figura 21. Simulaciones con el modelo Simplex de la curva paleoambiental Plioceno-Holoceno con relación a la altitud del bosque Andino en el área de la Subcuenca del Río Teusacá. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 21 se observa toda la información compilada de los modelos simplex, incluyendo las líneas medias lineales. Las dos simulaciones con actividad humana y sin actividad humana se han extrapolado hasta los 4 millones atrás para ilustrar

los efectos en la curva paleoambiental. La curva paleoambiental con influencia antrópica tiende a tener picos y valles más abruptos, mientras que la curva simulada sin actividad humana tiene picos y valles más suaves.

Finalmente se organizaron las simulaciones, preservando picos y valles; además, se agregaron todas las tendencias obtenidas con el modelo simplex en ciclos ideales. En la Figura 22, se presentan las simulaciones de la Curva Paleoambiental Plioceno-Holoceno. En la curva sin actividad antrópica se observan picos amplios de suave tendencia polinómica, una tendencia a estabilizarse en los 2.890msnm y los mínimos en los cuales la recuperación tiende a tener una tendencia exponencial. En la curva con actividad antrópica se observan amplios periodos cálidos constantes y periodos fríos que indican escasez de CO₂ atmosférico.

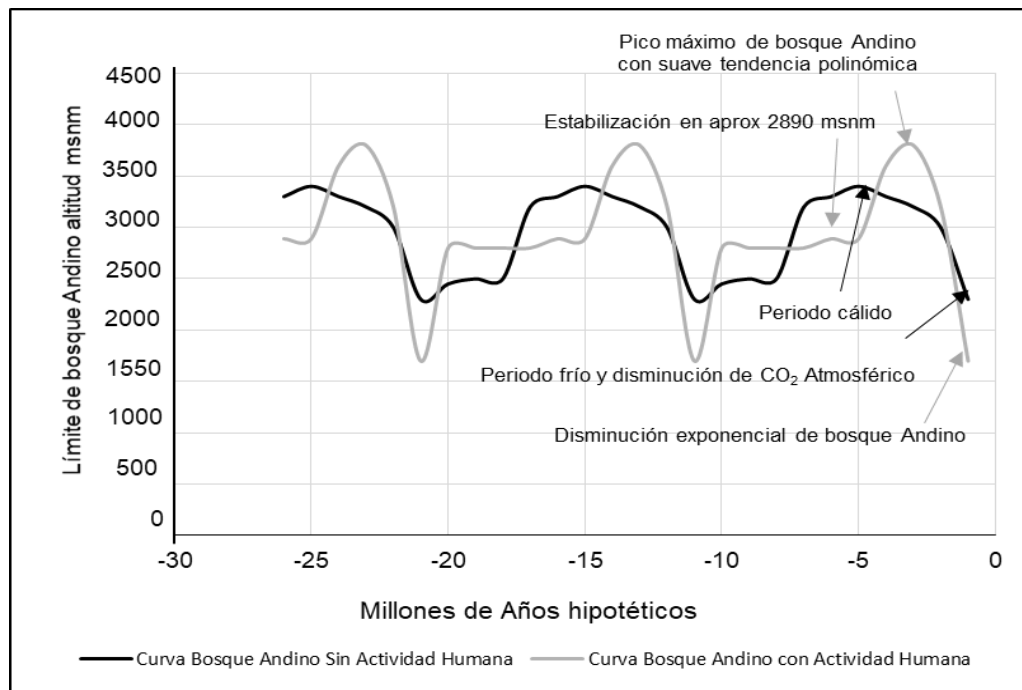


Figura 22. Simulaciones de la curva Paleoambiental Plioceno-Holoceno obtenidas con el modelo Simplex, sobre la cual se observa variaciones cíclicas ideales a partir de los datos obtenidos por tendencia lineal. Fuente: Elaboración propia.

7. DISCUSION DE RESULTADOS

7.1. De los Paleoesfuerzos en las fases de Orogenia Andina (3Ma) y Fase Final de Ajuste (1Ma) Eoceno-Pleistoceno en la Subcuenca del Río Teusacá.

Los resultados obtenidos no difieren mucho de los que se pueden inferir por el Rumbo S-N del Sinclinatorio del Valle del Río Teusacá. El control hidrodinámico del río Teusacá es estructural, esto implica que las aguas de la Subcuenca tienen su cauce en el eje de la estructura sinclinal. Además, el sistema de fallas Teusacá-Pericos-Santa Elena, tiene una dirección Sur-Norte heredada del eje principal del plegamiento. Esto es respuesta a los esfuerzos regionales Este-Oeste entre la placa Suramericana y la placa del Caribe.

También es evidente que la tectónica de placas y los fenómenos de remoción en masa, al igual que las mareas tienen una tendencia o derrape constante en dirección Oeste, mientras que existe un marcado efecto dínamo de cizalla en dirección Norte. Un plegamiento marcado N-S correspondería a un estilo pseudoductil de deformación con un esfuerzo principal E-W; según la exposición de las rocas, al parecer genera un cambio soterráneo hacia la deformación frágil la cual genera un esfuerzo de cizalla en dirección N-S generando paleoestructuras conocidas como Falla de Bogotá, Falla de Teusacá, Falla de Pericos, Falla de Santa Elena y Falla de San Lorenzo. A partir de la última Fase de Ajuste (1Ma, Gómez *et al.* 2015) el esfuerzo principal es N-S. El estilo estructural tiene componentes de varios modelos:

- Ramp/Fault con un detachment en el tope de la Formación Dura respecto a la base del Guadalupe Superior. Límite Terciario-Cretácico. En este punto estratigráfico despega la falla de Bogotá.
- Un estilo de Imbricated Fan de fallas con un detachment común a unos 2400 metros de profundidad.

- Una ventana estructural inversa o rumbohorst basin colmatado con los depósitos del Grupo Sabana y las formaciones Subachoque, Chía, Tilatá y las gravas de la Formación Cacho.
- No hay inversión de capas. El tope de la formación Dura es el Plano principal de Falla. Las fallas de Bogotá, Pericos, Teusacá y San Lorenzo tienen como plano de falla el Tope de la Formación Dura. Presencia de Slickenlines y exposición en volumen de ichnofósiles.
- La Fase de Orogenia Andina (3Ma, Forero-Suárez, 1990; Duque-Caro, 1990; Kellogg & Vega, 1995; Taboada *et al.* 2000), elevó el área de la Subcuenca del Río Teusacá desde un nivel aproximado al nivel del mar hasta los 2800 metros (inferido por la presencia de polen del género *Mauritia* en la formación Subachoque). Dada que la exposición es opuesta a la acción de la Fuerza de Gravedad se calculó que el vector Fortaleza del esfuerzo normal es de 0.1, lo que permite calcular el acortamiento horizontal en 28000 metros. El esfuerzo principal σ_1 tuvo vergencia E-W con una fortaleza del 80%, mientras que la cizalla σ_2 fue S-N con una fortaleza del 20%.
- La Fase Final de Ajuste (1Ma, Gómez *et al.* 2015) presenta un esfuerzo principal S-N con una fortaleza del 79%, mientras que la cizalla σ_2 fue E-W con una fortaleza del 20%. El cambio obedece al soterramiento que genera un estilo de deformación frágil en las rocas aflorantes.
- El cambio en la Fase Final de Ajuste (1Ma, Gómez *et al.* 2015), de un estilo de deformación pseudodúctil a un estilo de deformación frágil genera la configuración actual de la Subcuenca del Teusacá.

7.2. De la Curva Paleoclimática y Paleoambiental en la Subcuenca del Río Teusacá.

La curva Paleoclimática y Paleoambiental nos da información variada sobre el comportamiento del Bosque Andino a lo largo del tiempo Geológico. Como se

Observó el Bosque Andino inicialmente estaba compuesto por un bosque de *Myrica*, que luego fue reemplazada por *Weinmannia*; finalmente la *Weinmannia* fue reemplazada por *Alnus* y *Quercus* según Van Geel & Van der Hammen, 1973, Hooghiemstra & Ran, 1994 y Bogotá-Ángel *et al.* 2011.

El nivel base del límite Superior del Bosque Andino y el límite inferior de Páramo es de $2361 \pm 3,77\%$ metros para los últimos 2,5 Millones de años.

- En periodos de tiempo equidistantes se tienen variaciones de la altura del Bosque andino entre los $77,67 \pm 4,31\%$ metros a los $302,06 \pm 4,31\%$ metros.
- La altitud media del límite superior del Bosque Andino y el límite inferior del Páramo en el área de estudio es $2580,5 \pm 9,18\%$ msnm, y tiene un gradiente de 0,0105.
- Cuando el nivel de Bosque Andino alcanza el nivel máximo de $3161 \pm 14,09\%$ msnm descenderá 2 centímetros cada año.
- La curva es ligeramente positiva y muestra un incremento positivo en la temperatura respecto al nivel actual al clima de hace 2 millones y medio de años.

Actualmente, la Subcuenca del Río Teusacá se encuentra adjunta a la Subcuenca del Río Siecha dentro de la cual se encuentra el Embalse San Rafael y las plantas de tratamiento de aguas que surten parte del Acueducto de Bogotá y municipios aledaños; se considera generalmente la Subcuenca del Río Siecha aparte de la Subcuenca del Río Teusacá, aunque conforman un solo sistema hidromorfológico.

La Subcuenca del Río Teusacá presenta un cauce rectilíneo hacia el norte, según la clasificación Horton es de orden 6, y los subcanales, de ordenes 1 a 5 tienen una configuración dendrítica o arborescente. Esto indica que el control hidrológico es estructural y el cauce del río se ha acomodado en el eje del Sinclinorio de Teusacá.

La Subcuenca del Río Teusacá está también alimentada por aguas subterráneas acumuladas en la porosidad secundaria de la formación Guadalupe, y a lo largo de esta formación hay diferentes nacederos y manantiales en los que se genera parte de sus aguas; sin embargo, la mayor parte del caudal proviene del embalse San

Rafael, que alimenta el acueducto de más de 10 municipios pertenecientes a la Subcuenca del Río Teusacá y también a la ciudad de Santa Fé de Bogotá.

8. CONCLUSIONES

Se distinguen dos fases en la estructuración de la subcuenca del Río Teusacá, la primera la Orogenia Andina (3Ma) y la segunda la Fase Final de Ajuste (1Ma). La Fase de Orogenia Andina (3Ma) elevó el área de la Subcuenca del Río Teusacá desde un nivel aproximado al nivel del mar hasta los 2800 metros (inferido por la presencia de polen del género *Mauritia* en la formación Subachoque).

Dado que la exposición es opuesta a la acción de la Fuerza de Gravedad se calculó que el vector Fortaleza del esfuerzo normal es de 0.1, lo que permite calcular el acortamiento horizontal en 28000 metros. El esfuerzo principal σ_1 tuvo vergencia E-W con una fortaleza del 80%, mientras que la cizalla σ_2 fue S-N con una fortaleza del 20%. La Fase Final de Ajuste (1Ma) presenta un esfuerzo principal S-N con una fortaleza del 79%, mientras que la cizalla σ_2 fue E-W con una fortaleza del 20%. El cambio obedece al soterramiento que genera un estilo de deformación frágil en las rocas aflorantes.

En la subcuenca del Río Teusacá se determinó que un 63% de las rocas presentes son de edad plioceno-cuaternario, un 15% terciario medio e inferior y el 22% restante son de edad cretácica; acorde con el mapa realizado en el presente trabajo y los datos obtenidos con el programa Arc-Gis.

Los eventos glaciares más importantes, cuando el nivel inferior de la capa de hielo se situó bajo los 2800 msnm fueron el Estadial de Tagua y el Estadial de Carrizal (34000 años y 42500 años); estos eventos que corresponden Winsconsiniano modelaron facetas triangulares en los cerros orientales de Bogotá; en la Subcuenca del Río Teusacá, un extenso valle en U es también prueba de que se alojó una capa de hielo de más de 1000 metros de espesor en este periodo.

Los resultados de este trabajo son un aporte al conocimiento de la geología de la Subcuenca del Río Teusacá; aspecto básico en el proceso relacionado con análisis de amenazas naturales o riesgos geológicos.

9. RECOMENDACIONES

El presente trabajo contiene metodologías de integración de datos de campo y modelación matemática.

Los modelos matemáticos incorporados fueron los siguientes:

- Convertir dato de Morrenas a edad real.
- Calcular tasa de sedimentación de una cuenca.
- Hacer una notación en el Modelo Algebraico General con finalidad de forecasting o para la simulación de curvas paleoambientales.

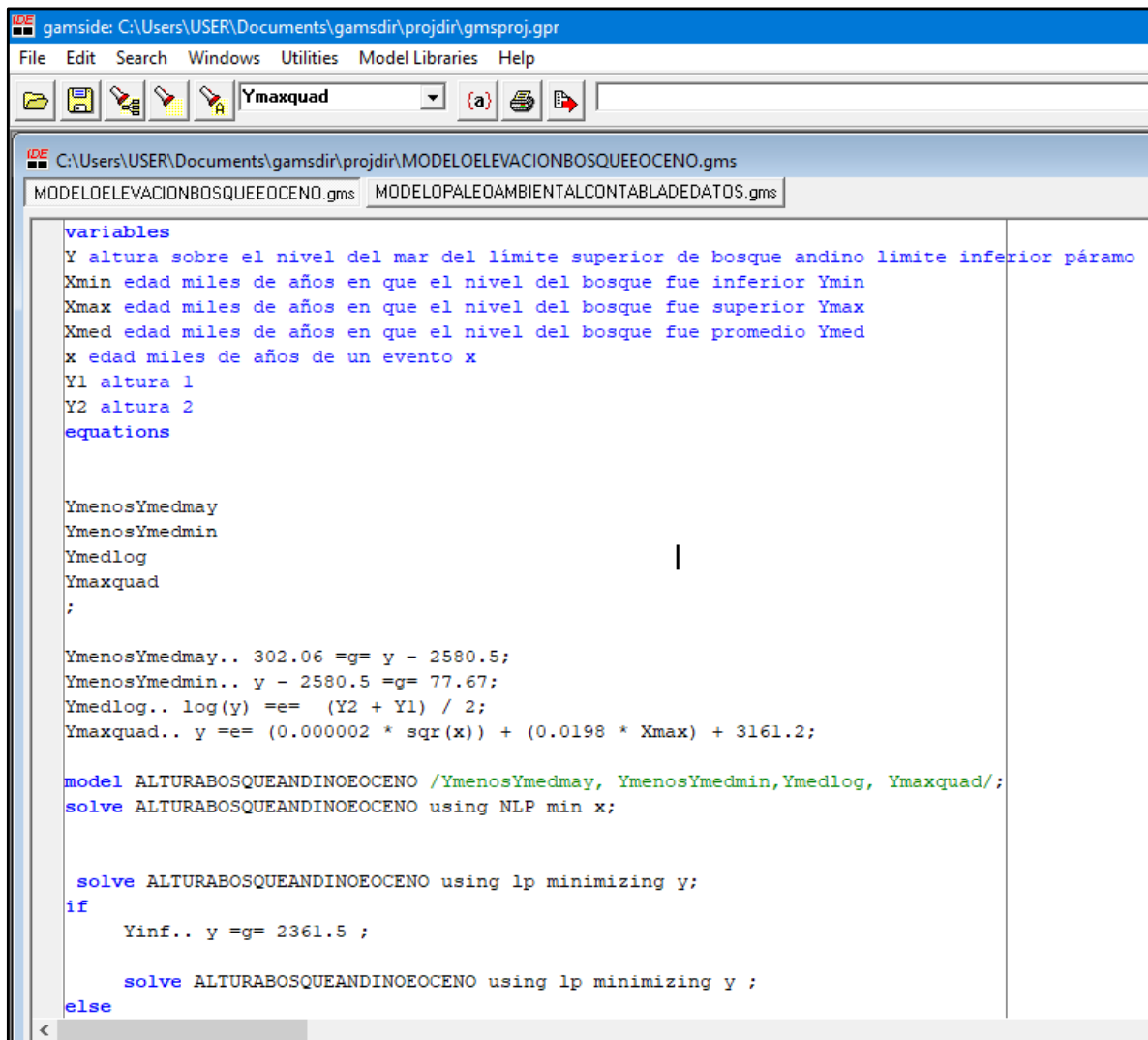
El número de soluciones o aplicaciones para el Modelo Algebraico General que se genera es infinito, como lo explican los programadores del software GAMS quienes reconocen que las aplicaciones en logística y economía están establecidas, pero las aplicaciones para forecasting o simulación en líneas de tiempo no ha sido desarrollada y en parte, se debe a la gran cantidad de casos que deben evaluarse dado que una curva tiene infinitos puntos y tangentes.

Dada la anterior explicación se recomienda lo siguiente:

- La ecuación de Morrenas al disponer datos de edad positivamente puede ser un ejemplo de forecasting.
- La tasa de sedimentación para unidades sin diagénesis puede calcularse conociendo los espesores de la unidad cronoestratigráfica.
- Antes de calcular en GAMS o Excel, cualquier variable debe suministrarse manualmente la pendiente de la tangente en el segmento de curva y debe aclararse si la pendiente es positiva o negativa.

- Se sugiere, elaborar el Modelo con el programa GAMS, para desarrollar la solución de la altura de bosque andino vs tiempo geológico para cada pregunta formulada. Para GAMS el autor ha elaborado un modelo con la configuración expuesta en las Tablas 13 y 14.

Tabla 13. Modelo en programa GAMS sin preguntas, las preguntas se deben plantear para cada caso.



```

gamside: C:\Users\USER\Documents\gamsdir\projdir\gmsproj.gpr
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help

Ymaxquad

C:\Users\USER\Documents\gamsdir\projdir\MODELOELEVACIONBOSQUEEOCENO.gms
MODELOELEVACIONBOSQUEEOCENO.gms MODELOPALEOAMBIENTALCONTABLADEDATOS.gms

variables
Y altura sobre el nivel del mar del límite superior de bosque andino límite inferior páramo
Xmin edad miles de años en que el nivel del bosque fue inferior Ymin
Xmax edad miles de años en que el nivel del bosque fue superior Ymax
Xmed edad miles de años en que el nivel del bosque fue promedio Ymed
x edad miles de años de un evento x
Y1 altura 1
Y2 altura 2
equations

YmenosYmedmay
YmenosYmedmin
Ymedlog
Ymaxquad
;

YmenosYmedmay.. 302.06 =g= y - 2580.5;
YmenosYmedmin.. y - 2580.5 =g= 77.67;
Ymedlog.. log(y) =e= (Y2 + Y1) / 2;
Ymaxquad.. y =e= (0.000002 * sqr(x)) + (0.0198 * Xmax) + 3161.2;

model ALTURABOSQUEANDINOEOCENO /YmenosYmedmay, YmenosYmedmin,Ymedlog, Ymaxquad/;
solve ALTURABOSQUEANDINOEOCENO using NLP min x;

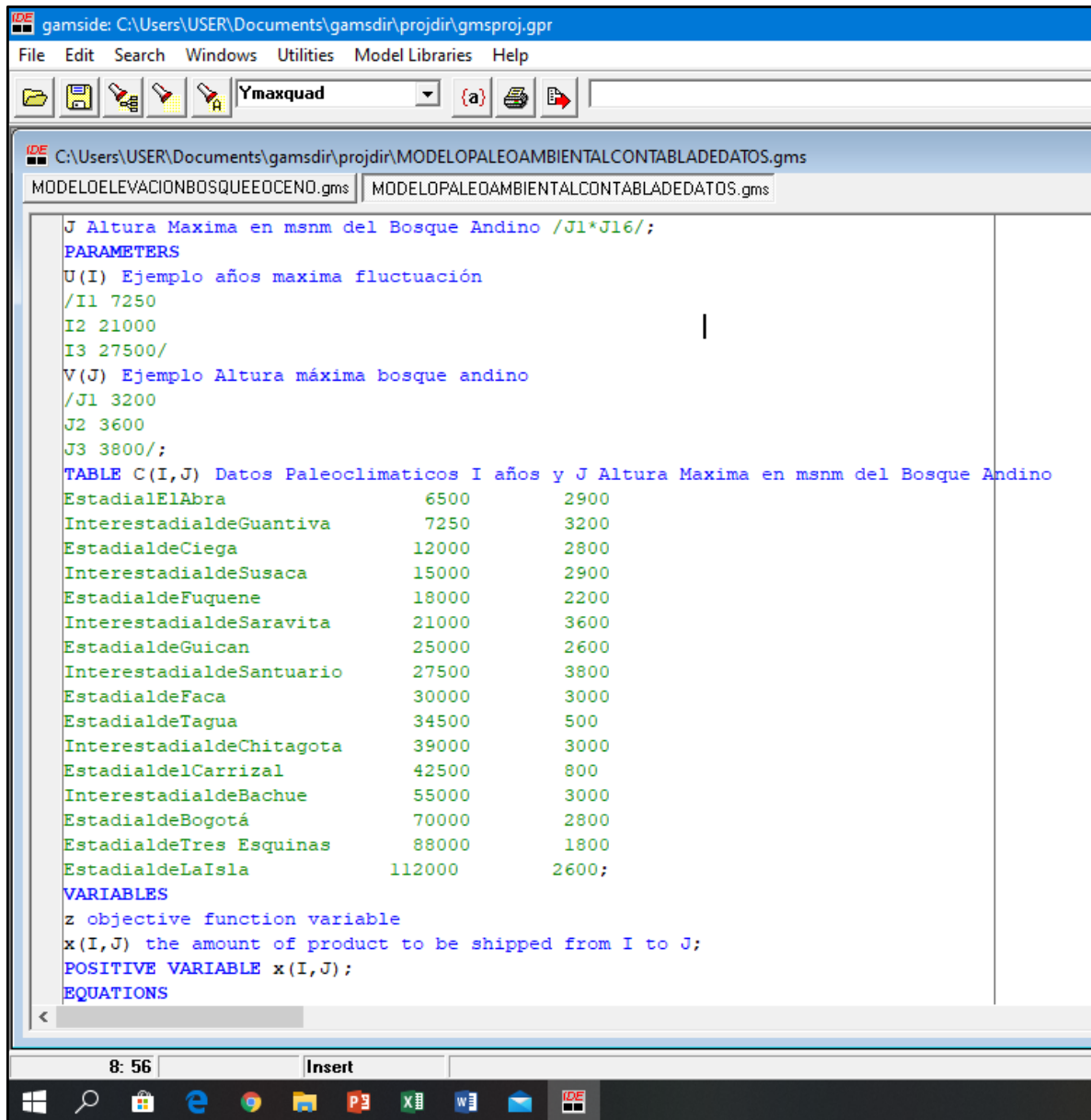
solve ALTURABOSQUEANDINOEOCENO using lp minimizing y;
if
  Yinf.. y =g= 2361.5 ;

  solve ALTURABOSQUEANDINOEOCENO using lp minimizing y ;
else

```

La Tabla 14, explica cómo se puede agregar una tabla de datos para el modelo GAMS.

Tabla 14. Como insertar una tabla de datos en un modelo GAMS.



```

gamside: C:\Users\USER\Documents\gamsdir\projdir\gmsproj.gpr
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help

Ymaxquad {a}

C:\Users\USER\Documents\gamsdir\projdir\MODELOPALEOAMBIENTALCONTABLADEDATOS.gms
MODELOLEVACIONBOSQUEEOCENO.gms MODELOPALEOAMBIENTALCONTABLADEDATOS.gms

J Altura Maxima en msnm del Bosque Andino /J1*J16/;
PARAMETERS
U(I) Ejemplo años maxima fluctuación
/I1 7250
I2 21000
I3 27500/
V(J) Ejemplo Altura máxima bosque andino
/J1 3200
J2 3600
J3 3800/;
TABLE C(I,J) Datos Paleoclimaticos I años y J Altura Maxima en msnm del Bosque Andino
EstadialElAbra          6500      2900
InterestadialdeGuantiva  7250      3200
EstadialdeCiega         12000     2800
InterestadialdeSusaca    15000     2900
EstadialdeFuquene       18000     2200
InterestadialdeSaravita  21000     3600
EstadialdeGuican        25000     2600
InterestadialdeSantuario 27500     3800
EstadialdeFaca          30000     3000
EstadialdeTagua         34500     500
InterestadialdeChitagota 39000     3000
EstadialdelCarrizal     42500     800
InterestadialdeBachue    55000     3000
EstadialdeBogotá        70000     2800
EstadialdeTres Esquinas  88000     1800
EstadialdeLaIsla        112000    2600;
VARIABLES
z objective function variable
x(I,J) the amount of product to be shipped from I to J;
POSITIVE VARIABLE x(I,J);
EQUATIONS
  
```

En cuanto a la aplicación directa de estos resultados en el proceso relacionado con el análisis de amenazas naturales o riesgos geológicos; únicamente, se ha analizado el aspecto de historia geológica de la Subcuenca de Río Teusacá, lo cual da una idea aproximada de la edad de sus rocas.

Los resultados de este trabajo son una aproximación al análisis geológico de la Subcuenca dado que solo se analizaron cinco puntos. En próximas investigaciones se sugiere ampliar los puntos de muestreo, la financiación y el tiempo para realizar los análisis.

10. REFERENCIAS

- Adriessen, P., Helmens, K., Hooghiemstra, H., Riezebos, P., Van der Hammen, T. (1993). Absolute chronology of the Pliocene-Quaternary sediment sequence of the Bogotá area Colombia. *Quaternary Science Reviews* 12 (7): 483-501.
- Anderson, E.M. (1951). *The Dynamics of Faulting*, 2nd ed., Edinburgh, Oliver and Boyd, pp. 206.
- Barrera-Cárdenas, F.A., Serrano, B., Kammer, A. (2006). Análisis de Paleoesfuerzos en una sección del grupo Quetame de la Cordillera Oriental Colombiana. *Revista de Investigación*, 6 (1): 17-27.
- Bogotá-Angel, R.G., Groot, M.H.M, Hooghiemstra, H., Lourens L.J., Van der Linden, M., Berrio, J.C. (2011). Rapid climate change from north Andean Lake Fúquene pollen records driven by obliquity: implications for a basin-wide biostratigraphic zonation for the last 284 ka. *Quaternary Science Reviews*, 30: 3321-3337.
- Bongiorno, F., Ucar, R. Belandria, N. (2011). Determinación de la dirección de los esfuerzos principales a través de análisis numérico y proyecciones estereográficas de la falla de Boconó en el sector Yacambú Estado Lara. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 32(2): 57-66.
- Botero, P.J. (1973) *Soils of Guasca-Guatavita, Colombia*. IGAC-International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences Netherlands.
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R. (1998). *GAMS: A User Guide*. GAMS Development Corporation. Washington, DC, USA. 262pp.
- Cardozo, N., Allmendinger, R.W. (2013). Spherical projections with OSXStereonet. *Computers & Geosciences*, 51: 193 – 205. doi:10.1016/j.cageo.2012.07.021.
- Castaño-Fernández, S. (1987). Concepto y desarrollo histórico de la Geología. *Ens. Rev. Facu. Educ. Albacete*, 1: 197–208.

- Dantzig, G.B. (1963). Linear Programming and Extensions. Santa Monica, CA: RAND Corporation. Available in: <https://www.rand.org/pubs/reports/R366.html>.
- Duque-Caro, H. (1990). Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and the evolution of the Panama Seaway. *Palae* 77: 203–234.
- Fernández-López, S. (1988). Bioestratigrafía y biocronología: su desarrollo histórico. En: Curso de conferencias sobre historia de la paleontología. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Col. Historia de la Ciencia: 185-215.
- Forero-Suarez, A. (1990). The basement of the Eastern Cordillera, Colombia: An allochthonous terrane in northwestern South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 3(2-3): 141-151.
- Gómez, J., Nivia, Á, Montes, N.E., Almanza, M.F., Alcárcel, F.A., Madrid, C.A. (2015). Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia. En: Gómez, J. & Almanza, M.F. (Editores), *Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 33, p. 9-33. Bogotá.
- Goosse, H., Barriat, P.Y., Lefebvre, W., Loutre, M.F., Zunz, V. (2010). Introduction to climate dynamics and climate modeling. Online textbook available at <http://www.climate.be/textbook>.
- Graveolis, T., Ploskas, N., Samaras, N. (2013). Combining Interior and Exterior Simplex Type Algorithms. Conference: 17th Panhellenic Conference in Informatics (PCI'13), 19–21 September, At Thessaloniki, Greece. Available in: https://www.researchgate.net/publication/304744716_Combining_interior_and_exterior_simplex_type_algorithms
- Guerrero, J., Sarmiento, G. (1996). Estratigrafía Física, Palinológica, Sedimentológica y Secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera. *Geología Colombiana*, 20: 3-66.

- Harland, B., Armstrong, R., Cox, A., Craig, L., Smith, A., Smith, D. (1989). A geologic time scale 1989. Cambridge: Cambridge University Press.
- Helmens, K., Van der Hammen, T. (1994). The Pliocene and Quaternary of the high plain of Bogotá (Colombia): A history of Tectonic uplift, basin development and Climatic change. *Quaternary International* 21: 41-61.
- Helmens, K., Van Der Hammen, T. (1995). Memoria explicativa para los mapas del Neogeno-Cuaternario de la Sabana de Bogotá-Cuenca Alta del Río Bogotá. (Cordillera Oriental, Colombia). En: *Análisis Geográficos* No. 24: 91-142.
- Herzberg, C., Condie, K., Korenaga, J. (2010). Thermal History of the Earth and Its Petrological Expression. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 292: 79-88.
- Hooghiemstra, H., Ran, T.H.E. (1994). Late Pliocene-Pleistocene high resolution pollen sequence of Colombia: An overview of climatic change. *Quaternary International* 21: 63-80.
- IGAC. (2000). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca: Mapas Temáticos.
- Julivert, M. (1963). Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. *Boletín de Geología*, 13-14: 5-104. Bucaramanga.
- Kellogg, J.N., Vega, V. (1995). Tectonic development of Panama, Costa Rica, and the Colombian Andes: constraints from global positioning system geodetic studies and gravity. *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*.
- Loaiza, J., Sánchez-Espinoza, J., & Rubiano, Y. (2017). Late pleistocene polygenetic Andean wetland soils. *GeoResJ* 14: 20-35.
- MADS. (2014). Guía Técnica para la Formulación de Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá D.E., Colombia. 104 pp.

- Maya, M. 2001. Distribución, facies y edad de las rocas metamórficas de Colombia. INGEOMINAS, 54pp.
- Nikishin, A. M. (2011). The Geological History and Geodynamics of the Earth. Moscow University Geology Bulletin, 66 (4): 225-241.
- Pelayo, F. (1996). Teorías de la Tierra y Sistemas Geológicos: un largo debate en la historia de la Geología. Asclepio, 48(2): 21-52.
- Pérez-Malvárez, C., Bueno-Hernández, A., Feria M., Ruíz R. (2006). Noventa y cuatro años de la Teoría de la Deriva Continental de Alfred Lothar Wegener. Interciencia, 31(7): 536-543.
- Scholz, C. (2007). Fault Mechanics. 441-483 p. In Treatise on Geophysics. 1st Edition, Gerald Schubert Editor. Elsevier Science. Available in: https://www.researchgate.net/publication/224962637_610_Fault_Mechanics
- Struth, L., Babault, J., Teixell A. (2015). Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. Geomorphology 250: 370–383.
- Taboada, A., Rivera, L.A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics 19, 787–813.
- Uyeda, S., Kanamori, H. (1979). Back-Arc Opening and the Mode of Subduction. Journal of Geophysical Research, 84(B3):1049-1061.
- Van der Hammen, T., Werner, J., & Van Dommelen, H. (1973). Palynological record of the upheaval 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 (1-2) 1-42, 47-81, 84-122.
- Van Geel, B., Van der Hammen, T. (1973). Upper quaternary vegetational and climatic sequence of the Fuquene area (Eastern Cordillera, Colombia). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 14 (1): 9-55, 73-92.

- Ward, P.D. (2006). Impact from the Deep. Scientific American (October 2006): 65-71.
- Zachos J.C., Dickens, G.R., Zeebe, R.E. (2008). An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. Nature, 451: 279-283.
- Zalasiewicz, J., Williams, M. (2015). Climate Change through Earth's History. Chapter 1, 3-17p. In: Climate Change (Second edition), Elsevier B.V.