

# De la descomposición de rocas a la formación de suelos: un cambio de paradigma en la enseñanza de la geología en Antioquia, Colombia (1887-1965)

Susana Salazar<sup>1\*</sup> ; Andrés Ochoa<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

(\*) [ssalazarj@unal.edu.co](mailto:ssalazarj@unal.edu.co)

<sup>2</sup>Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. [aocchoaj@unal.edu.co](mailto:aocchoaj@unal.edu.co)

## Resumen

Cuando en 1963 se publicó “Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia” de Gerardo Botero Arango en los *Anales de la Facultad de Minas*, el conocimiento de los procesos de meteorización en Antioquia era limitado. Si bien la obra presenta una aproximación a los procesos exógenos, la atención a la meteorización química en la región de Antioquia no se produjo sino hasta la tesis de su alumno Michel Hermelin Arbaux, en 1965. La meteorización química que influye en la formación de materiales como regolitos, saprolitos y suelos, así como en la evolución del relieve, apenas tuvo reconocimiento en la segunda mitad del siglo XX en Colombia. Por esta razón el “Estudio preliminar sobre la descomposición de algunas rocas del Batolito Antioqueño” de Michel Hermelin, junto con investigaciones posteriores sobre meteorización química, proporcionaron una comprensión más profunda de cómo estos procesos influyen en la formación de paisajes y suelos en Antioquia y, por extensión, en toda Colombia. Introducido por geólogos, pero ampliamente desarrollado por pedólogos y geomorfólogos, el nuevo conocimiento y la conciencia de los procesos superficiales dieron lugar a una mejor comprensión de la geomorfología tropical y la geología ambiental en el país. Este artículo presenta el contexto histórico de la enseñanza de las ciencias de la Tierra en la entonces Escuela Nacional de Minas (1887-1940), la importancia de los procesos exógenos en la visión integral de la geología y su impacto en la geología aplicada en Antioquia. Incentivado por Gerardo Botero Arango, el estudio sobre la “descomposición (*sic*)” de las rocas del Batolito Antioqueño fue más allá de ser un estudio de meteorización química, fue pionero en Antioquia y llamó la atención sobre la diferencia entre los materiales, procesos y geoformas de las zonas tropicales que difieren de aquellos en las zonas templadas.

**Palabras clave:** Andes Colombianos; Altiplano de Antioquia; Geomorfología tropical; Meteorización química; Procesos exógenos; Pedogénesis.

## From rock decomposition to soil formation: a paradigm shift in the teaching of geology in Antioquia, Colombia (1887-1965)

### Abstract

When “Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia” by Gerardo Botero Arango was published in 1963 in *Anales de La Facultad de Minas*, knowledge of weathering processes in Antioquia was limited. Although this work introduced an approach to exogenous processes, attention to chemical weathering in the region did not emerge until the thesis of his student,

Forma de citar: Salazar, S.; Ochoa, A. (2024). De la descomposición de rocas a la formación de suelos: un cambio de paradigma en la enseñanza de la geología en Antioquia, Colombia (1887-1965). *Boletín de Geología*, 46(3), 229-245. <https://doi.org/10.18273/revbol.v46n3-2024010>

Michel Hermelin Arbaux, in 1965. Chemical weathering, which plays a key role in the formation of materials such as regoliths, saprolites, and soils, as well as in landscape evolution, only gained recognition in Colombia during the second half of the 20th century. Consequently, Michel Hermelin Arbaux's thesis, *Estudio preliminar sobre la descomposición de algunas rocas del Batolito Antioqueño*, along with subsequent research on chemical weathering, has greatly enriched our understanding of how these processes influence landscape and soil formation in Antioquia and, more broadly, throughout Colombia. Originally introduced by geologists but extensively developed by pedologists and geomorphologists, this new knowledge and awareness of surface processes have enhanced our understanding of tropical geomorphology and environmental geology in the country. This article reviews the historical context of earth science education at the then National School of Mines (1887-1940), the importance of exogenous processes in a holistic view of geology, and their impact on applied geology in Antioquia. Encouraged by Gerardo Botero Arango, the study of the “decomposition (sic)” of the rocks of the Antioquian Batholith went beyond a simple examination of chemical weathering; it was a pioneering effort in Antioquia that underscored the differences in materials, processes, and landforms between tropical and temperate regions.

**Keywords:** Colombian Andes; Antioquian Plateau; Tropical geomorphology; Chemical weathering; Exogenic processes; Pedogenesis.

## Introducción

Los procesos superficiales (exógenos), aquellos que son más accesibles a la observación directa y que dieron origen a varios de los principios básicos de la geología, estuvieron relegados por muchos años en la enseñanza formal de esta ciencia en Colombia (Figura 1A). En la Escuela Nacional de Minas de la primera mitad del siglo XX —la misma donde el emblemático Gerardo Botero Arango (1911-1986), junto con sus colegas Alejandro Delgado y Hernán Garcés, dieron origen al pregrado en Ingeniería de Geología y Petróleos en 1941 (Rodríguez-Vega, 2008)—, la enseñanza en ciencias de la Tierra se centraba en los procesos endógenos. Esto no difería de las cátedras de geología que se impartían en el mundo; la sismología enfocaba el interés de los geocientíficos hacia el interior de la Tierra (Beckinsale y Beckinsale, 1989). Sin embargo, es importante recordar que fue “el dilema de la denudación” y la observación de la forma externa de la Tierra lo que dio lugar a la geología naciente de Hutton (1726-1797) y Playfair (1748-1819). Estos pioneros reconocieron los procesos endógenos, o “las causas internas” de la Tierra, en contraposición a los procesos exógenos (Tinkler, 1985).

Luego de establecer la teoría huttoniana, Lyell (1797-1875) formalizó una serie de principios geológicos dando lugar al *uniformismo*, un principio básico, autoevidente, aplicable a muchas áreas de la ciencia (Tinkler, 1985). Ya no había vuelta atrás, la geomorfología había exhibido en superficie los pliegues, las rocas ígneas y las discordancias; a inicios del siglo XIX era el momento de que los procesos internos tomaran protagonismo. Mientras tanto,

los procesos exógenos (o externos) iban quedando relegados de la geología y ocupaban más espacio en la geografía física (Tinkler, 1985). Un enfoque en procesos endógenos también estaba en concordancia con el contexto histórico de la Antioquia minera que dio origen a la Escuela de Minas, de Medellín en 1887 (Murray, 1997). Por consiguiente, era de esperarse que el pregrado en Ingeniería de Geología y Petróleos de la Facultad Nacional de Minas, en 1941, se proyectara inicialmente en dirección de los recursos minerales y energéticos del subsuelo terrestre, que ya desde el siglo XIX eran foco de la economía regional y global.

Es importante destacar que la perspectiva de las ciencias de la Tierra, que hasta los años 40 se centraba en minería, experimentó un notable avance con la realización del trabajo de grado de Gerardo Botero Arango titulado “Bosquejo de la paleontología colombiana”, en 1936. Su tesis, pionera en el campo de la estratigrafía y paleontología de Colombia, fue un intento por trascender los límites regionales. Este trabajo enriqueció la cartografía geológica en Colombia y dio una visión más holística al incorporar datos paleontológicos (Etayo-Serna, 2007). Ya como decano de la Facultad Nacional de Minas, a principios de los años 40, Gerardo Botero Arango parecía tener una visión integral de la geología. En 1943, resaltó la sinergia entre la geología y la agricultura, y subrayó la importancia de abordar el estudio de suelos de forma sistemática y menos empírica (Figura 1C). Pero es en su obra “Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia”, publicada en 1963 (Figura 1B), donde Botero Arango se acercó al contexto de la geología de superficie, el cual denominó como fisiografía (Botero-Arango, 1963).

No obstante, solo hasta 1965, después de veinticuatro años de fundada la carrera de Ingeniería de Geología y Petróleos, el trabajo de grado “Estudio preliminar sobre la descomposición de algunas rocas del Batolito Antioqueño” (Figura 1D), realizado por Michel Hermelin Arbaux y dirigido por Gerardo Botero Arango (Hermelin, 1965), dio otra perspectiva a la investigación en geociencias en Antioquia. Fue un giro a comprender los procesos de la superficie terrestre. Era necesario cambiar el paradigma de procesos destructivos vs. constructivos del siglo XVIII, arraigado en términos como “descomposición de la roca”, para empezar a observar la “formación del suelo”. Volver a ver la geología desde los inicios del pensamiento científico de Hutton, de una forma integral. Pero era, además, hacer el mismo recorrido, la observación de superficie y suelos hasta llegar a la roca, así como lo hicieron Hutton, Playfair y Lyell (pioneros de la geología).

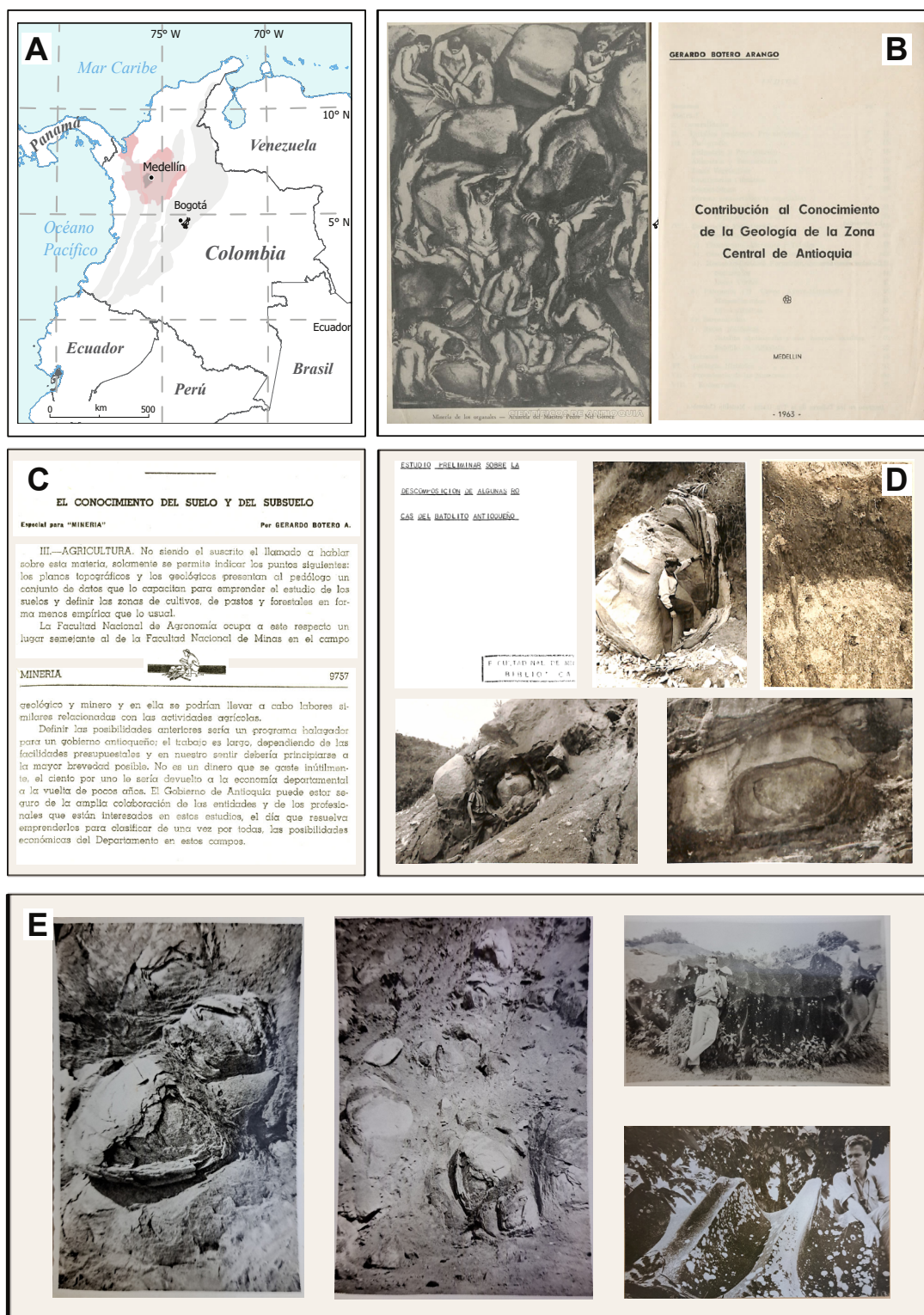
La formación del suelo fue la inspiración de Hutton, gracias a su inclinación innata por la agricultura (Dean, 1989). Si el suelo era fundamental para el hombre y provenía de los procesos denudativos (o de la destrucción de cuerpos existentes), *¿Qué mecanismo podría convertir esos materiales “suelos” en roca nuevamente y perpetuar el propósito benéfico de crear suelo indefinidamente?* (Tinkler, 1985). Inevitablemente, el ciclo de las rocas daba origen a una teoría que proponía “una máquina perfecta” y que podía crear suelo de forma perpetua (Gould, 1983). Si al igual que Hutton, el suelo fuera el punto de partida, se podría entonces dar respuesta —mediante el estudio de los procesos de “descomposición de la roca”— a muchos de los fenómenos geológicos que ocurren en las latitudes bajas. Porque es en el trópico, donde los materiales y procesos geológicos están fuertemente influenciados por los procesos exógenos (e. g., la meteorización química), y minimizarlos debilita la visión integral de la geología.

Basta con revisar el significado de las lateritas para darse cuenta cómo una visión reduccionista de regolitos y suelos tropicales llevó durante décadas a un vacío conceptual. El término laterita fue motivo de discusión de geólogos, geomorfólogos y edafólogos desde el siglo XIX hasta mediados del siglo XX (Thomas, 1974; Sánchez, 2019). La ausencia de estudios exhaustivos en regiones tropicales hizo que se tuviera una percepción equivocada sobre la uniformidad de regolitos y suelos ricos en óxidos de hierro, por lo que se creó lo que Sánchez (2019) denominó el paradigma

de las lateritas. Bajo este paradigma, basado en gran parte en estudios en África tropical (e. g. Vageler y Greene, 1933; Mohr y van Baren, 1954) se asumió hasta ~1940 que la mayoría de los regolitos y suelos tropicales eran de naturaleza laterítica, cuando en realidad conforman menos del ~7% de la zona tropical (Sánchez, 2019).

El desconocimiento de las zonas tropicales también hizo que se pasara por alto un concepto que Humboldt (1769-1859) y Caldas (1768-1816), y posteriormente Holdridge (1907-1999) y Jenny (1899-1992), reconocieron en Colombia: la zonalidad altitudinal. La interacción de factores geográficos, climáticos y geológicos crea una diversidad de productos de meteorización y ecosistemas que tienen una marcada zonalidad altitudinal. Sin embargo, no es hasta ~1947 que se formalizó esta zonificación en una clasificación bioclimática (Holdridge, 1947). Durante la primera mitad del siglo XX, la idea preconcebida de una homogeneidad en los tipos de suelos llevó a ideas erróneas. Esto tuvo efectos regresivos en las ciencias de la Tierra, como lo demuestra Jenny, quien tuvo que replantear su modelo y las ecuaciones de formación del suelo después de realizar (en ~1946) investigaciones en latitudes bajas (Salazar et al., 2023).

El objetivo de este artículo es hacer una breve revisión de la historia de la enseñanza de los procesos exógenos en las ciencias de la Tierra en la Facultad Nacional de Minas, bajo la influencia de los trabajos de Gerardo Botero y Michel Hermelin. Un cambio de paradigma que migra de un enfoque centrado en los procesos endógenos a un enfoque más integral que incluye los exógenos. Su comienzo se remonta a 1963 como una aproximación a la geografía física (fisiografía) que da contexto a la *Geología de la zona central de Antioquia* (Figura 1B; Botero-Arango, 1963), pero se concreta metodológicamente con la tesis de Michel Hermelin, dirigida por Gerardo Botero Arango en 1965 (Hermelin, 1965). En el cuerpo principal del artículo se dan importantes antecedentes biográficos y el estado del arte en los procesos superficiales de la geología durante la primera mitad del siglo XX en la Escuela Nacional de Minas (1887-1940). Después de examinar la tesis “Estudio preliminar sobre la descomposición de algunas rocas del Batolito Antioqueño” (Figura 1D), se discute el impacto y el interés que este trabajo despertó en estudiar los procesos exógenos en Antioquia. Finalmente, se concluye con la influencia y aplicaciones que tienen los procesos exógenos en un ambiente tropical.



**Figura 1.** A. Mapa de Colombia con el departamento de Antioquia. B. Portada de la revista *Anales de la Facultad de Minas* en 1963 y del artículo "Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia" de Gerardo Botero Arango. C. Publicación en 1943 en la revista *Minería* del artículo "El conocimiento del suelo y del subsuelo" por Gerardo Botero Arango. D. Tesis de Michel Hermelin (1965). "Estudio preliminar sobre la descomposición de algunas rocas del Batolito Antioqueño". E. Fotos del Batolito Antioqueño tomadas en 1965 por Michel Hermelin, pertenecientes al Fondo Michel Hermelin, Universidad EAFIT.

### La geología de la Escuela Nacional de Minas durante la primera mitad del siglo XX: la omisión de los procesos exógenos

Fundada en 1887 por Tulio Ospina y Pedro Nel Ospina, la Escuela Nacional de Minas de Medellín formaba exclusivamente ingenieros de minas, ya que formalizar los estudios de minería en el territorio antioqueño constituía una necesidad de la época (Murray, 1997). En Antioquia, tan ligada históricamente a la minería de oro desde el poblamiento por españoles (siglo XV), y especialmente durante el siglo XIX, científicos como Humboldt y Boussingault plasmaron en sus escritos sobre oro y platino descripciones geológicas precarias (Boussingault, 1827; SPH, 1838; McDonald y Hunt, 1982). No obstante, aparte de los mapas de las minas de la provincia de Antioquia de de Greiff (1857) y de los relatos de Restrepo (1888), en forma de crónicas, no se disponía para la segunda mitad del siglo XIX de estudios rigurosos de la geología en Antioquia (Castro y Hermelin, 2003). No es sino hasta los mapas de Grosse (1926) y Scheibe (1927, 1933) que Antioquia pudo contar con una buena cartografía geológica (Castro y Hermelin, 2003).

La institución académica de ese entonces (de finales del siglo XIX) tenía como modelo los estatutos de la Escuela de Minas de California, Berkeley, donde Tulio y Pedro Nel Ospina habían obtenido el título de ingenieros de minas (Laverde, 1940; Castro y Hermelin, 2003). Si el crecimiento de la minería antioqueña, el transporte ferroviario y el cultivo del café habían creado una demanda de profesionales con conocimientos técnicos para desarrollar en minería, a principios del siglo XX, la manufactura urgía de una educación para un enfoque más empresarial (Murray, 1997). Y, aunque en 1892 el programa inicial de Ingeniería de Minas se había modificado para formar profesionales en Ingeniería Civil, este no se consolidó sino hasta agosto de 1911 cuando fue aprobado por el Ministerio de Educación (Villegas-Botero, 2015). Solo hasta entonces la Escuela empezó a lograr sus objetivos, sin tropiezos, en formar ingenieros *esforzados y honorables* que respondían al surgimiento de las nuevas empresas industriales en Medellín (Murray, 1997). Tanto ingeniería de minas como civil compartían las mismas asignaturas en los tres primeros años de ambos programas (Villegas-Botero, 2015).

En enero de 1940, la Escuela Nacional de Minas se anexó a la Universidad Nacional de Colombia y pasó a llamarse Facultad Nacional de Minas (Villegas-Botero, 2015). En 1941, Gerardo Botero Arango,

primer decano, creó junto con sus colegas Alejandro Delgado y Hernán Garcés la carrera de Ingeniería de Geología y Petróleos (Rodríguez-Vega, 2008). Mediante una reforma curricular (resolución número 380 del 2 de diciembre de 1941) se promovió la Ingeniería de Geología y Petróleos en sincronía con el establecimiento de un Ministerio de Minas y Petróleos en 1940 (Castro y Hermelin, 2003; Rodríguez-Vega, 2008). De forma casi paralela, la Ingeniería Civil y la Ingeniería de Minas y Metalurgia emergieron como programas distintos y renovados, después de compartir el título conjunto de Ingeniero Civil y de Minas hasta 1946 (Villegas-Botero, 2015). Hasta entonces, la minería y la mineralogía eran los protagonistas de las ciencias de la Tierra en la Facultad, con apenas un elemento nuevo: la paleontología (Botero-Arango, 1936, 1937).

Hacia 1941, el entonces decano parecía tener una visión más amplia de la ingeniería. Profundizar en otras áreas del conocimiento como la paleontología, la estratigrafía, la geotecnia y la edafología iba en concordancia con la reforma curricular que proponía diversificar las ingenierías creando la Ingeniería de Geología y Petróleos (Rodríguez-Vega, 2008). La apertura de esta carrera fue previsiva debido al aumento en la demanda de ingenieros de petróleo del país, con motivo de la reversión a la Nación en 1951 de la Concesión de Mares (Villegas-Botero, 2015). Sin embargo, y a pesar de que el mismo Gerardo Botero Arango fue un importante contribuyente a los estudios de paleontología y estratigrafía en Colombia — especialmente por la documentación bibliográfica y las colecciones de comparación que trajo al país (Etayo-Serna, 2007)—, el enfoque de las geociencias estaba en los procesos endógenos. Y no era para menos, la economía extractiva de minerales e hidrocarburos de Colombia y el mundo estaba en todo su apogeo (Villegas-Botero, 2015).

Entre 1941 y 1965, los trabajos de grado de la hoy Facultad de Minas estuvieron enfocados en diversos problemas de ingeniería y minería. Aun con la apertura de Ingeniería de Geología y Petróleos, y juzgando por las investigaciones del momento, la formación de geocientíficos no parecía tener mucha inclinación hacia los procesos superficiales. Con omisión de la paleontología, que le dio a Gerardo Botero Arango reconocimiento internacional (Rodríguez-Vega, 2008), la enseñanza de las ciencias de la Tierra iba teniendo una orientación con mayor énfasis en las rocas duras (*i. e.* ígneas y metamórficas). Mientras tanto, en Bogotá, se hacían los *Estudios geológicos y paleontológicos sobre*

la *Cordillera Oriental de Colombia* (Departamento de Minas y Petróleos, 1937), se formaba el Servicio Geológico Nacional de Colombia (SGNC), en 1939 (Etayo-Serna, 2007), y llegaba a Colombia el científico José Royo y Gómez, quien hizo parte del SGNC entre 1939 y 1951, y cuyo principal propósito fue elevar el estatus de la paleontología a nivel internacional (Acosta, 2009). Esto dio un giro a las demandas académicas de geólogos en el país y es entonces cuando en 1955 se crea en la Universidad Nacional, Bogotá, la Especialidad en Geología y Geofísica (Patarroyo, 2006).

Con un pregrado en geología en Bogotá, entre 1941 y 1965, la Facultad Nacional de Minas no tenía necesidad de formar paleontólogos, sedimentólogos o expertos en procesos exógenos. Las condiciones geográficas y geológicas de Antioquia no solo exponían un laboratorio natural de rocas ígneas y metamórficas, sino que la historia minera e industrial antioqueña le cedía el estudio de rocas sedimentarias a quienes las tenían más a la mano en la Cordillera Oriental (e. g. Etayo-Serna, 2007). Cabe anotar que en ambas escuelas (Medellín y Bogotá), hasta ese momento, los procesos exógenos estaban simplificados a aquellos que daban origen a las rocas sedimentarias. Los procesos de meteorización no eran más que un minúsculo paso previo a la acumulación de sedimentos y la diagénesis en el ciclo de las rocas.

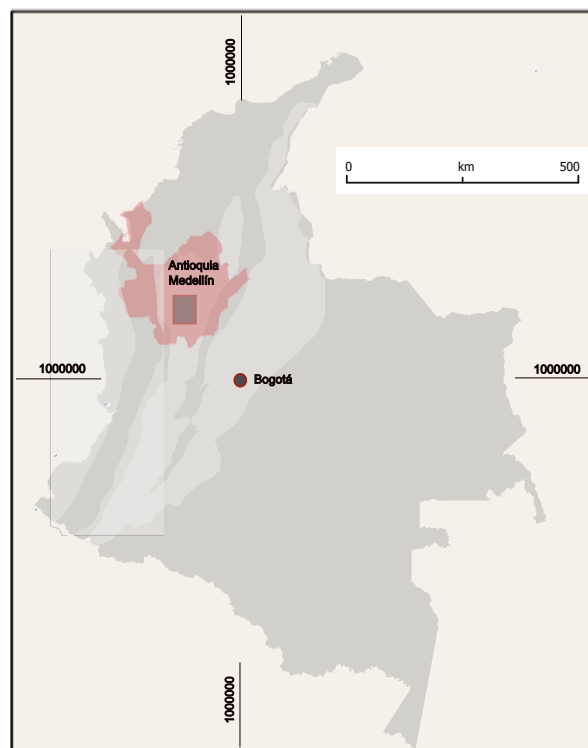
### **De vuelta a observar los procesos exógenos de la zona central de Antioquia**

#### ***La tesis “Estudio preliminar sobre la descomposición de algunas rocas del Batolito Antioqueño” (Hermelin, 1965)***

En el período entre aproximadamente 1940 y 1965, que marcó el inicio de las interacciones entre las facultades de Minas y Agronomía, se estableció una conexión directa entre las áreas del conocimiento, especialmente en lo que respecta a los procesos exógenos. Este vínculo se fortaleció con la incorporación a la Universidad Nacional tanto del Instituto Agrícola Nacional, en 1937 (que desde 1914 constituía la Escuela de Agricultura Tropical y Veterinaria; Decreto 2212 del 23 de diciembre de 1937), como de la Escuela Nacional de Minas en 1940. En 1938, el Instituto Agrícola Nacional adquirió el estatus de Facultad Nacional de Agronomía (González, 1983; Acuerdo 103 del 30 de noviembre de 1938), mientras que en 1940 la Escuela Nacional de

Minas se transformó en la Facultad Nacional de Minas (Acuerdo 5 del 22 de enero de 1940).

En la convergencia de estas dos facultades, no en vano, el Batolito Antioqueño —un extenso y antiguo complejo de rocas ígneas intrusivas cretácicas, de composición granodiorítica a tonalítica, que abarca gran parte del territorio antioqueño (Figura 2; Botero-Arango, 1942, 1963; Duque-Trujillo *et al.*, 2019; Restrepo-Moreno *et al.*, 2019)— representó un punto de encuentro entre la geología y la agronomía. Esta formación geológica, denominada por Botero Arango en 1940 (Botero, 1940), ha sido históricamente de gran interés económico por su riqueza en minerales auríferos explotados desde la época precolombina (Boussingault, 1827; Botero, 1940; Feininger y Botero, 1982). También presenta un profundo interés geológico, ya que constituye un vestigio importante de la interacción de las placas Farallón y Caribe con la porción noroeste de la placa Suramericana durante el período Meso-Cenozoico (Duque-Trujillo *et al.*, 2019; Duque-Palacio *et al.*, 2021).



**Figura 2.** Figura modificada de Botero-Arango (1963), la cual muestra el mapa de Colombia con el departamento de Antioquia, las cordilleras y en un recuadro lo que denominó la zona central de Antioquia.

A medida que se exploraba la geología del Batolito Antioqueño, varios estudios se llevaron a cabo desde el inicio del siglo XX, comenzando con figuras destacadas de la geología en Colombia como [Ospina-Vásquez \(1911\)](#) y los trabajos de [Scheibe \(1933\)](#) y [Posada \(1913, 1936\)](#). Sin embargo, fue la labor de Gerardo Botero Arango, con sus contribuciones en petrografía y cartografía en 1942 y 1963 ([Botero-Arango, 1942, 1963](#)), la que sentó las bases para los estudios posteriores, incluidos aquellos realizados en el ámbito geomorfológico, agronómico y de las ciencias de la Tierra en general. No era para menos, la gran extensión del Batolito Antioqueño ([Feininger y Botero, 1982](#)) hace de esta unidad un importante material parental de los saprolitos y suelos de Antioquia ([Figura 2](#)).

Hacia el año 1943, Gerardo Botero Arango, quien había sido decano de la Facultad Nacional de Minas entre 1940-1942, compartió sus reflexiones en la revista *Minería* ([Botero-Arango, 1943](#)) ([Figura 1C](#)), donde dejaba entrever su concepción de la interconexión entre las ciencias geológicas y del suelo. En su escrito, subrayó la complementariedad entre la geología y la agricultura, y enfatizó la necesidad de abordar el estudio de los suelos de forma más sistemática. Además, sugirió la aplicación de enfoques similares a los utilizados en la minería, para desarrollar un programa de gobierno en Antioquia que explorara las oportunidades económicas en la agricultura ([Botero-Arango, 1943; Figura 1C](#)).

Coherente con la importancia de una visión integral de la geología en 1963, dos años antes de la tesis de Hermelin, incluyó en su trabajo “Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia” una sección titulada “Fisiografía”. En esta sección aborda asuntos como la climatología, la relación de la altimetría con la precipitación y la temperatura, la zonificación de la vegetación, la geomorfología y la hidrografía. Resalta la importancia de la cantidad de lluvia y su distribución estacional en la zona de estudio. Conoce el forzamiento de la migración de la zona de convergencia intertropical y reflexiona sobre las alteraciones del régimen de precipitación por causa de la orografía local apoyándose en [Riehl \(1954\)](#) y [Trojer \(1954\)](#). Critica el sistema de clasificación climática de Köppen, que estudió en la traducción al español de 1948 ([Köppen y Pérez, 1948](#)), porque le parece que no funciona bien en su área de estudio debido a los umbrales de temperatura, y plantea usar una adaptación propuesta por [Trewartha \(1943\)](#) que incorpora una clasificación especial para climas de montaña. En otras palabras, reconoce de manera implícita la idea de

zonabilidad altitudinal de Humboldt y Caldas a quienes también cita. En cuanto a las formas geomorfológicas especiales (peñoles, organales) de Antioquia hace un acercamiento a su génesis. De igual manera, hace un llamado de atención sobre el patrón de variación pluviométrica con la orografía presentando datos de Medellín, Caldas, Rionegro, El Retiro, Mazo y San Pedro (*i. e.* Valle de Aburrá y sus alrededores). Analiza la estacionalidad bimodal y unimodal relacionándolas con la cercanía al ecuador y citando a [Nagelschmidt \(1944\)](#).

Y como el maestro, así el discípulo. La perspectiva holística de la geología encontró resonancia en quien más adelante definiría a un geólogo, inspirándose en Humboldt, como un naturalista en el sentido más completo ([Hermelin, 1978](#)). El encuentro entre Gerardo Botero y Michel Hermelin fue como cuando un maestro se tropieza con un alumno altamente receptivo y sus ideas se reflejan y destacan a través de él. De esta manera, Michel Hermelin Arboux comenzó a forjar su trayectoria como geomorfólogo probablemente sin percatarse de ello, a juzgar por su elección de estudios de maestría y doctorado en rocas duras en Estados Unidos ([Hermelin, 2011](#)).

En 1964, un año antes de completar su educación universitaria, Hermelin recibió una invitación para impartir un curso fundamental de geología a estudiantes de agronomía ([Hermelin, 2011](#)). El mismo año fue profesor de la Facultad de Minas ([Consejo de la Facultad de Minas, 1964](#)) y en 1965 se hizo su nombramiento como profesor asistente en la Facultad de Agronomía ([Espinal, 1964; Hermelin, 2011](#)). Mediante los cursos de química básica, geomorfología, mineralogía de suelos y geología que ofreció para los programas de Ingeniería Agronómica, Ingeniería Forestal y Zootecnia ([Hermelin, 2011](#)), pudo fortalecer su formación en procesos exógenos. Su formación se expandió posteriormente durante su tiempo en Colorado State University y Princeton University, Estados Unidos, donde realizó cursos complementarios en geomorfología y suelos ([Hermelin, 2011](#)).

El primer trabajo detallado de los procesos de meteorización que registra la Facultad Nacional de Minas es la tesis “Estudio preliminar sobre la descomposición de algunas rocas del Batolito Antioqueño” ([Hermelin, 1965](#)). Dirigida por Gerardo Botero Arango, la tesis hace una síntesis de la química de los procesos de meteorización, un tema que nacientes pedólogos, con formación de geólogos como Dokuchaev (1846-1903), dominaban

desde 1886 (Buol *et al.*, 2011). Es así como la tesis era una propuesta interesante en cuanto a la revisión bibliográfica actualizada en pedología con fuentes importantes europeas como Schaufelberger (1894-1976) y Duchaufour (1912-2000), y norteamericanas como Jenny (1899-1992). Innovadora desde la temática hasta la metodología, que proponía cuantificar la intensidad de la meteorización de las rocas del Batolito Antioqueño; esta investigación daba un giro en el enfoque de las geociencias en Antioquia.

Con una introducción sucinta y estructurada en el capítulo I, Hermelin (1965) define los factores de meteorización, probablemente basado en los factores de formación de Jenny de quien cita su principal trabajo *Factors of Soil Formation* (Jenny, 1941). A excepción del tiempo, define el material parental (desde los elementos químicos y los minerales hasta las rocas), el clima (en términos de temperatura y agua, que estaría relacionada a la precipitación), la topografía y los organismos. En ese mismo capítulo, explica las reacciones químicas propias de los procesos de meteorización y los productos de la meteorización enfocados en rocas ígneas.

En el segundo capítulo, define los criterios de selección de las muestras teniendo en cuenta las rocas ya cartografiadas, principalmente por Botero-Arango (1942, 1963), las condiciones topográficas (demarcadas por la ceniza volcánica) y el clima (que incluye una clasificación climática-ecológica). También propone una descripción del perfil de meteorización en campo. En el tercer capítulo cita la bibliografía existente y actualizada de los métodos que se podrían utilizar para identificar los productos de la meteorización; sin embargo, enfatiza que para su estudio solo es posible hacer un tipo de análisis de los siete propuestos. Los análisis químicos, descritos en el capítulo cuarto, se realizaron en cooperación con los profesores del Departamento de Química.

Las conclusiones se presentan en forma de análisis de resultados dentro de la tesis usando una adaptación del método de Niggli. En la tesis lo mencionan así “decidimos de acuerdo con el Profesor Ospina escoger el sistema de Niggli, tal como lo describe Schaufelberger (1942, 1962), modificándolo un poco” (Hermelin, 1965). En esencia, este método modificado tenía como objetivo encontrar índices (factor de deslave) para cuantificar la meteorización. Hallazgos importantes de la tesis son: el aumento residual de aluminio y, en menor cantidad, de hierro; la disminución de silicio a una tasa lenta, y la formación

de minerales secundarios como caolinita y gibsitita. También está la disminución de elementos como Na, K, Ca y Mg (lo que se denominan bases del suelo). Mientras hay un aumento de elementos y minerales secundarios desde la profundidad a la superficie, las bases del suelo disminuyen de manera paulatina.

Tanto los resultados como el método modificado de Niggli fueron visionarios para su época. No fue sino hasta 1970 con el índice de meteorización de Parker (1970), y alrededor de 1980 con el índice de meteorización de Nesbitt y Young (1982), que se pudo realizar una caracterización de los perfiles de meteorización al incorporar la química de los óxidos mayores en la muestra total. Los resultados que se hicieron en investigaciones posteriores sobre la meteorización del Batolito Antioqueño llegaron de forma general a las mismas tendencias de meteorización planteadas en la tesis de Hermelin (Kimiya, 1982). Los métodos posteriores, basados en la fluorescencia de rayos-X y la difracción de rayos-X, aunque muy precisos, no miden las tasas de meteorización, lo que se convirtió en una preocupación central en los estudios subsiguientes de Hermelin y sus estudiantes (Osorio *et al.*, 2003; García y Hermelin, 2004).

La tesis de Hermelin dirigida por Botero (1965) integra conocimientos de procesos endógenos y exógenos. Requiere del conocimiento en rocas ígneas provenientes del interior de la Tierra (*i. e.* intrusivas), como también de elementos de geomorfología, química, clima, procesos biológicos y pedología. Esta tesis es, en síntesis, una metodología para evaluar cómo interactúan el clima, los organismos y el relieve, en un tipo de roca específico (ígneas y plutónicas para el caso particular de esta provincia geológica). Podría decirse que es una tesis innovadora y que debe darse mérito también a su director, el doctor Gerardo Botero Arango, porque dicho trabajo implicaba explorar asuntos poco estudiados para el contexto histórico de la Facultad de Minas hasta ese momento.

### ***El impacto de retomar los procesos exógenos en geología***

Enfatizar en los procesos exógenos también despertó el interés por el estudio en otros campos de las geociencias como la geología del Cuaternario, la geomorfología tropical y la geología ambiental, donde esta última tuvo un amplio desarrollo a partir de la segunda mitad del siglo XX en Antioquia (*e. g.* Hermelin, 1978, 1979, 1987, 1990a). Estas ciencias llegaron a materializarse en los años 70, primero en la Facultad Nacional de Agronomía y luego en la Facultad de Ciencias (Gómez



*et al.*, 1970; Hermelin, 2011). Empiezan a aparecer trabajos detallados de los procesos de meteorización, pero con enfoques más pedológicos, donde se aplican técnicas novedosas como la difracción de rayos X (e. g. el trabajo de grado de ingeniería agronómica “Mineralogía de las arcillas y análisis químico de los suelos de Urabá” (Gómez *et al.*, 1970).

En efecto, el trabajo de Hermelin (1965) sentó un precedente: el estado de los perfiles de meteorización y regolitos (en la región central de Antioquia; Figura 2) daba claves del pasado geológico. También era un acercamiento para entender el origen del material parental de los suelos. Estudiar los procesos de meteorización y sus productos era utilizar el principio del *uniformismo* y *gradualismo*, aun cuando el mismo Lyell en sus *Principios de geología* (1830-1833) y las escuelas de geología de la primera mitad del siglo XIX los despreciaran (Tinkler, 1985). Siendo la meteorización un proceso importante dentro del *uniformismo* (e. g. en el ciclo de las rocas en la formación de los sedimentos), estuvo relegada probablemente por el sesgo ambiental de las latitudes altas. En vez de los procesos denudativos, el controvertido concepto que se venía elaborando de una deriva superficial (después deriva continental) era una explicación más aceptada de la topografía en superficie a principios del siglo XX (Tinkler, 1985). De igual manera parecía ocurrir en la Facultad de Minas hasta los años 60, especialmente porque las necesidades del país y de Antioquia requerían más especialistas en ingeniería de petróleos y de minas que expertos en procesos superficiales.

Los procesos de meteorización no se veían tan cruciales en la formación del relieve, a diferencia de los erosivos, fluviales y glaciales, que ocupaban las publicaciones de Davis (1850-1934) en la última década del siglo XIX y que perduraron hasta después de los años 50 (e. g. Chorley *et al.*, 1973). Los pedólogos, por el contrario, comprendían la importancia de la meteorización en la formación del suelo desde la aparición de la ciencia del suelo en ~1880 (e. g. Duchaufour, 1982), y llegaron incluso a sobredimensionarla en los ambientes tropicales (e. g. Sánchez, 2019). Pero en geología, únicamente hasta los textos de Dana (1863) y Geikie (1882), la meteorización cobra una vana importancia como “la geología dinámica” (Tinkler, 1985).

Solo a finales de los 80 y a partir de los años 90 — cuando se desarrollaron técnicas geoquímicas de

mayor precisión—, la información completa de las rocas con minerales primarios (originarios de la roca) y secundarios (productos de alteración) se empezó a utilizar para predecir la geología en el subsuelo de zonas altamente meteorizadas (Brimhall *et al.*, 2006). La información petrográfica de rocas frescas y alteradas, junto a los datos geoquímicos, permitió producir patrones de zonificación para detectar menas potenciales o corredores prospectivos de mineralización exótica (Brimhall *et al.*, 2006). En resumen, el análisis geoquímico abarcó desde la escala macro hasta la micro y se enfocó en elementos presentes en rocas tanto frescas como alteradas, lo que contribuyó significativamente al proceso de mapeo geológico. Este enfoque integral permitió una comprensión más completa de los procesos de formación de minerales primarios, así como de las modificaciones posdeposicionales que dan lugar a la formación de minerales secundarios (Brimhall *et al.*, 2006). Este ejemplo ilustra cómo la geología de superficie puede complementar nuestra comprensión de los procesos que ocurren en el interior de la Tierra.

No era de extrañar entonces que, en Colombia hasta ~1960, la meteorización se entendiera también como “descomposición de la roca” y constituyera más un asunto de pedólogos. Más aún, la visita de Hans Jenny a Colombia en 1946, para comprender mejor cómo los procesos de meteorización y pedogenéticos operaban en las latitudes bajas (Salazar *et al.*, 2023), fue un asunto que pasó desapercibido por los geólogos. El tránsito desde la roca “original” al suelo parecía un asunto binario, pertinente a un geólogo cuando era roca y a un pedólogo cuando se transformaba en suelo. La transición, en este caso referida a la meteorización química, especialmente significativa en entornos tropicales, quedaba en un espacio difuso. Por esta razón, el estudio sobre la “descomposición (*sic*)” de las rocas del Batolito Antioqueño (Hermelin, 1965) fue más allá de ser un estudio de meteorización química. Al establecer las bases para el estudio sistemático de los productos de meteorización, sentaba el precedente de cómo los materiales, procesos y geoformas que predominan en Antioquia diferían de las zonas templadas y, por ende, debían abordarse de otra manera. Identificar los procesos que de la roca conducen a los saprolitos y regolitos, y que son el material parental del suelo, daba fundamentos para el desarrollo de la geomorfología tropical en el país.

## **La influencia y aplicaciones que tienen los procesos exógenos en un ambiente tropical: la geomorfología tropical**

### ***Breve historia de la geomorfología***

La geomorfología —con raíces tan antiguas como los principios de Steno en *De Solido* ~1660 (Steno y Winter, 1916), los cuales sugirieron que la historia pasada de la superficie terrestre se podía interpretar a partir de rocas, minerales, fósiles y rasgos geográficos (Davies, 1989)—, también tuvo un renacimiento, aunque más de un siglo después, con Hutton en ~1790 (Dean, 1989). En contraposición a los visibles procesos exógenos, surgen los procesos endógenos o “las causas internas” de la Tierra (Tinkler, 1985). En *Theory of the Earth* (Hutton, 1795), Hutton se ocupa en el segundo capítulo de los hechos y observaciones de la topografía. La conciencia de los accidentes geográficos y los procesos involucrados en sus formas, según Dean (1989), dan los fundamentos al nacimiento de la ciencia de la geomorfología. Hutton planteó que las rocas actuales se forman a partir de la destrucción de las anteriores y son transportadas al mar. El suelo (su interés inicial), que se formaba de la destrucción (*e. g.* erosión) de la tierra, era necesario para el crecimiento de las plantas. En realidad, todo hacía parte de un gran ciclo por el cual se aseguraba la fertilidad continua de la tierra (Tinkler, 1985).

Hutton, además de establecer que la fuerza que dobló los estratos (originalmente horizontales) es la misma que los elevó a sus posiciones actuales, sugirió que estos estratos elevados estaban posteriormente expuestos a fuerzas erosivas (Dean, 1989). Estas fuerzas incluyen las ejercidas por ríos y glaciares durante un amplio lapso (Tinkler, 1985). Reconstruyó e imaginó los cambios del paisaje hasta llegar a especular la configuración actual de las masas terrestres, divididas eventualmente por la erosión marina (Dean, 1989). A finales del siglo XVIII surgieron los opositores al gradualismo huttoniano, y apareció el catastrofismo en contraposición, para explicar el origen de los fósiles y formación de montañas (Tinkler, 1985). Fue la indagación de modelos racionales para comprender la causa de las geoformas terrestres, como montañas, llanuras y mesetas, la que llevó por mucho tiempo a buscar respuesta en el catastrofismo (Beckinsale y Beckinsale, 1989), cuyos mayores argumentos se basaban en la observación directa de las geoformas, procesos superficiales y materiales.

Los modelos catastrofistas afectaron la reputación de la geomorfología (Beckinsale y Beckinsale, 1989) hasta la aparición de William Morris Davis (1850-1934;

fundador de la *geología fisiográfica*), quien estableció los fundamentos sobre los cuales se desarrolló la geomorfología entre 1880 y 1930 (Chorley *et al.*, 1973). Esto determinó que, en la primera mitad del siglo XX, en la Facultad de Minas y en el mundo, las nociones de geomorfología estuvieran reducidas a comprender el ciclo de Davis (*e. g.* Chorley *et al.*, 1973). Davis, quien había publicado el *Ciclo geográfico* para establecer el ciclo completo de la vida de un río, en 1889, iba a ser el referente en la ciencia de la geomorfología durante el siguiente medio siglo (Chorley *et al.*, 1973).

Aunque desde Steno y Hutton se tenía la noción de que a partir de rocas, minerales, fósiles y accidentes geográficos se podía leer un relato de eventos pasados en la historia de la superficie global, la reconstrucción de los paisajes no dejaba de ser una interpretación geohistórica (Davies, 1989). Por ejemplo, no se tenía mucha noción de entender el paisaje como un equilibrio dinámico tal y como lo proponía John Tilton Hack entre 1957-1965 (Hack, 1975; Osterkamp, 1989; Tinkler, 1989; Osterkamp y Hupp, 1993). El principio del equilibrio dinámico para responder problemas y características del paisaje era una propuesta que confrontaba el ciclo erosivo davisiano (Hack, 1975; Osterkamp, 1989). Pero es probable que este concepto fuera ajeno a las nociones de geomorfología de los ingenieros geólogos y de petróleos de la Facultad de Minas, porque, en general, la geomorfología se percibía únicamente como la descripción de geoformas (Gupta, 2011).

Lo que sí estaba en pleno apogeo en los años 50 eran las discusiones de los modelos más significativos relacionados con los grandes rasgos físicos globales de la Tierra. Desde los cambios del nivel del mar (eustasia), combinado con continentes estables, pasando por la inestabilidad vertical de las masas terrestres (diastrofismo), hasta los desplazamientos horizontales de los continentes, era tema de los geocientíficos interesados en conocer las causas de la evolución del relieve (Beckinsale y Beckinsale, 1989). Ya a principio de los 60, se consolida la hipótesis sobre la expansión del fondo oceánico (Hess, 1962), que, junto con la hipótesis de la deriva continental (Wegener, 1912), dan origen directamente a la teoría de la tectónica de placas; esta última terminó de consolidarse a finales de la década de los 60 (Beckinsale y Beckinsale, 1989). Era precisamente una discusión de la cual geomorfólogos, geofísicos y geógrafos podrían beneficiarse, gracias al enfoque unificador que la tectónica de placas ofrecía para comprender la causa de las grandes geoformas terrestres (Beckinsale y Beckinsale, 1989).

### ***El surgimiento de la geomorfología tropical y sus aplicaciones en Antioquia***

Después de la Segunda Guerra Mundial, alrededor de 1960, en el mundo empieza a cobrar interés la “geomorfología climática” (desarrollada principalmente por Büdel (1944, 1969) con sus geoformas (climo) morfogenéticas), cuyo eco desde Europa llega con retraso a los países tropicales (Tinkler, 1985). Ideas que probablemente influenciaron a pedólogos como Duchaufour, quien diferenció tres tipos principales de alteración en los trópicos con base en zonas climáticas (Duchaufour, 1953). El respaldo a la ciencia del suelo en las colonias de África tropical benefició directamente a la geomorfología tropical al ser disciplinas afines (e. g. Mohr y van Baren, 1954; Vageler y Greene, 1933; Wirthmann, 2000). A través de los pedólogos era posible tener ejemplos que reflejaban el efecto del ambiente en el paisaje, un acercamiento más directo a la geomorfología tropical (e. g. Gupta, 2011). Era de esperarse que, en los programas académicos relacionados con las ciencias de la tierra de la Facultad de Minas, la geomorfología tropical también tuviera su entrada de la mano de la pedología.

En el manuscrito que sentó las bases para los estudios posteriores de meteorización química del Batolito Antioqueño, Gerardo Botero Arango había realizado una minuciosa investigación sobre el clima y su influencia en la formación de bauxita, además de estudiar geoformas como peñones y organales (Botero-Arango, 1963). Aunque no menciona los regolitos ni los suelos, incluía, sin duda, una descripción fisiográfica y de geoformas, como el mismo autor lo menciona en la tabla de contenido. Si bien el documento tiene breves elocuciones acerca del posible origen de las *geoformas especiales* (Botero-Arango, 1963), estas son solo una introducción superficial. Era necesario profundizar en los procesos que dieron lugar a la formación de los espesos regolitos y cuya erosión dejó peñoles de “roca dura” como geoformas relictas en el paisaje. Pero ¿cuáles fueron los procesos que dieron lugar a la Piedra del Peñol y a los organales, de valor estético invaluable, que sirvieron de inspiración a artistas como Pedro Nel Gómez? (e. g. Figura 1B. portada de *Anales de la Facultad de Minas*; Botero-Arango, 1963). Aunque amplia, esta pregunta expuso las limitaciones existentes, en ~1960, sobre el conocimiento de los procesos exógenos en Antioquia y que motivaron a abordar la meteorización cuantitativamente para comprender el origen de los espesos regolitos.

Cuando Michel Hermelin desarrolló metodológicamente su estudio sobre la meteorización química del Batolito Antioqueño (Hermelin, 1965; Figura 1D), no solo se basó en literatura actualizada sobre meteorización química, como los trabajos de Keller (1957) y Pedro (1964), sino que también incorporó referencias esenciales en el ámbito de la pedología, incluidas las contribuciones de Jenny (1941) y Duchaufour (1960). Tanto los estudios de Botero Arango en 1963 como la tesis de Hermelin en 1965 permitieron establecer una relación entre el clima y los productos de la meteorización (i. e. los minerales y las geoformas) (Botero-Arango, 1963; Hermelin, 1965). Como resultado de esta conexión, en 1976 se realizó el primer intento de clasificaciones morfogenéticas basadas en el clima en Antioquia, el cual se documenta en el trabajo *Bases para un estudio geomorfológico del departamento de Antioquia* (Hermelin, 1976). Este trabajo estaba en sintonía con la dirección que estaba tomando la geomorfología a nivel mundial.

Con raíces en la geomorfología climática de Büdel (1944, 1969, 1982) surge en el mundo en los 70 la geomorfología tropical de regiones húmedas. La escuela de pensamiento de esta ciencia naciente estuvo formalizada por Michael Thomas en 1974 con su obra *Tropical geomorphology: a study of weathering and landform development in warm climates* (Thomas, 1974; Wirthmann, 2000), y tuvo como motivación comprender la mayor intensidad y velocidad con la que ocurren los procesos superficiales en latitudes bajas en comparación con las zonas templadas. Estos procesos son los responsables de la formación de materiales como regolitos y saprolitos, así como de las geoformas asociadas a ellos en regiones tropicales (e. g. Gupta, 2011; Wirthmann, 2000).

De igual manera, en Antioquia, la diferencia en los materiales y procesos de las regiones tropicales húmedas respecto a las zonas templadas llevó a los nacientes geomorfólogos a partir de los años 60 y 70, a comprender la transición de la roca al suelo. Las laderas del trópico húmedo se moldean en regolitos y saprolitos (blandos), fácilmente erosionables, que alimentan los ríos tropicales (Gupta, 2011). Por esta razón, en el trópico andino, la meteorización química es un proceso fundamental en el estudio de la evolución del paisaje. Pero el interés por entender los materiales y procesos no terminó en una simple curiosidad científica. El estudio de la geomorfología tropical aplicada a la solución de problemas asociados

a cambios antropogénicos rápidos del medioambiente tiene un avance en Antioquia durante los siguientes 50 años (Hermelin, 1975, 1984, 1988, 2006, 2013; Toro y Hermelin, 1993; Hoyos y Hermelin, 2002).

Procesos morfodinámicos de las zonas urbanas como el Valle de Aburrá (*e. g.* el deslizamiento de Villatina 1987) fueron un aliciente para desarrollar la geología ambiental en el país (Hermelin, 1987, 1990a), tan importante en la planificación urbana de zonas con alta amenaza por las pendientes pronunciadas, las condiciones climáticas y la sismicidad (Hermelin, 1990b). Un ejemplo de la implementación efectiva de la geología ambiental y la geomorfología fue la propuesta de zonificación del suelo para la gestión del riesgo, enfocada al ordenamiento territorial (Aristizábal y Hermelin, 2011). Porque tanto la geología ambiental como la geomorfología proporcionan una base científica para la toma de decisiones en los planes de ordenamiento territorial en Colombia, ya que determinan las restricciones para la ocupación del territorio (Hermelin, 2013).

Las combinaciones fatídicas entre factores externos, como el clima, y factores internos, como los sismos, tienen el potencial de impactar negativamente la agricultura, las poblaciones, los procesos urbanísticos y las obras civiles. Estas circunstancias subrayan la importancia de investigar la geología de superficie, un campo de gran relevancia en el trópico húmedo andino, caracterizado por la presencia de profundos regolitos y una alta incidencia de movimientos en masa. Conocer los procesos, las tasas y el estado del sistema geomórfico permite modelar e interpretar o predecir los cambios del paisaje en el tiempo (Huggett, 2011).

Los trabajos preliminares de Botero-Arango y Hermelin, desarrollados en la segunda mitad del siglo XX, tuvieron repercusiones significativas en la forma como se abordan los problemas de geomorfología en la actualidad. Por ejemplo, los estudios más recientes en los Andes emplean técnicas avanzadas de geología isotópica (Duque-Palacio *et al.*, 2021), las cuales se focalizan en la meteorización de rocas, perfiles saprolíticos y características del paisaje, como *etchplain* e *inselbergs*. Este enfoque ha sido fundamental para establecer criterios cronoestratigráficos de formas y procesos que moldean el paisaje, especialmente en el Altiplano Antioqueño. A nivel global, la consideración de la interacción entre la tectónica, el clima, la litología y las estructuras ha dado lugar a la conceptualización de la morfología-

tectónica como un nuevo campo emergente (Burbank y Anderson, 2013). Desde la morfotectónica, son varios los estudios que reconocen fases importantes de levantamiento tectónico y denudación en la región Central de Antioquia, lo cual generó aparentes ciclos múltiples de peneplanación, levantamiento e incisión durante el Cenozoico (Restrepo-Moreno *et al.*, 2019 y referencias allí).

Dirigir la atención nuevamente hacia los procesos exógenos en la zona central de Antioquia (Figura 2) marcó el primer paso para concebir la geología de manera integral; abarca desde la roca, pasa por el regolito, hasta formar suelo, porque los procesos exógenos y endógenos están interconectados (Vondráčková *et al.*, 2015), y entender su dinámica es clave para interpretar la evolución del relieve en un entorno tropical. La geomorfología tropical ofrece un marco conceptual y metodológico especializado para entender la evolución del relieve en las regiones tropicales, donde los procesos y las condiciones son distintivos y requieren un enfoque adaptado a su complejidad (Gupta, 2011). Es ahí donde precisamente radica el mérito de Gerardo Botero Arango, en dirigir nuestra atención hacia el contexto de los procesos geológicos, inspirando así un enfoque renovado para abordar las geociencias en nuestra región y nuestro país.

## Conclusiones

En la década de 1960, cuando empieza a surgir la geomorfología tropical, hay un cambio de paradigma en el mundo. Entender que los procesos de meteorización en el trópico húmedo actúan a mayores tasas y sobre espesos regolitos y saprolitos diferentes a los de las zonas templadas, fue una revelación para los geocientíficos. En esa misma década la enseñanza y la comprensión de los procesos exógenos en la geología de Antioquia, Colombia, también tuvo un cambio y pasó de un enfoque principalmente endógeno a una visión más integral que empezó a reconocer la importancia de los procesos superficiales en la formación del paisaje y la geología ambiental. Gerardo Botero Arango desempeñó un papel fundamental en fomentar una perspectiva más holística de la geología en Colombia, primero en su tesis de grado (Botero-Arango, 1936) y luego en su obra “Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia” (Figura 2; Botero-Arango, 1963). Pero fue el trabajo de grado de su estudiante Michel Hermelin en 1965 el que permitió dar a conocer para Antioquia conceptos y aproximaciones geocientíficas

novedosas al involucrar una serie de referencias bibliográficas actualizadas en pedología y geoquímica de procesos exógenos y aplicarlos localmente. En busca de entender los procesos que alteraban las rocas ígneas previamente cartografiadas por Botero Arango en 1940, 1963 (Botero-Arango, 1963), Hermelin desarrolló una metodología que adaptó el método de Niggli (utilizado en petrografía de rocas ígneas) para evaluar cuantitativamente la cantidad de elementos meteorizados y los minerales secundarios que se formaron a partir de ellos. Luego dio el contexto ambiental de cómo actúan el clima, los organismos y el relieve sobre las rocas ígneas del Batolito Antioqueño.

Haciendo una analogía de cómo la observación de los procesos exógenos lleva a la comprensión de los procesos endógenos, se toma como referencia a Steno, Hutton, Playfair y a Lyell, quienes utilizan la geomorfología para elaborar sus principios. Tanto los principios de Steno sobre los estratos, como el ciclo de las rocas de Hutton y el uniformismo de Lyell están inspirados en los accidentes geográficos y los procesos involucrados en sus formas. Y, aunque estos tuvieron lugar en zonas templadas (que de alguna manera subestimaron la meteorización química y sus productos), lo que se quiere resaltar es cómo la observación del paisaje y los materiales que lo componen contribuyen a las diferentes áreas de la geología. Evaluar cuantitativamente la meteorización química es un asunto que el mismo Hermelin menciona como “relativamente poco estudiado... porque contiene un buen número de factores demasiado variables”. Desde la temática en sí misma hasta las referencias que contiene, el trabajo que comienza con Gerardo Botero en 1963, que da contexto a la tesis, y que sigue en una serie de documentos posteriores, elimina los límites difusos entre pedología y geología. En otras palabras, completa eslabones en el conocimiento, fragmentados por énfasis distintos. Se dio paso al estudio de la geomorfología tropical y la geología ambiental en Antioquia, las cuales pudieron refinarse en los 50 años siguientes, hasta llegar a influenciar trabajos muy recientes fundados sobre técnicas isotópicas modernas.

Entender los materiales de alteración y los suelos que componen las geoformas del trópico húmedo posibilita dar un uso adecuado de los recursos. Desde la geología económica hasta la geología ambiental, el conocimiento de los materiales y procesos superficiales fortalece la exploración de recursos, pero también las restricciones que impone la naturaleza para su utilización. Además, lo que puede ser más importante en geología aplicada,

la geología de superficie permite modelar y predecir el efecto que tienen las variables ambientales sobre los materiales donde se localizan las zonas urbanas. Es el primer paso para evaluar y, eventualmente, mitigar los procesos superficiales que tienen un alto riesgo geológico en zonas tropicales.

## Referencias

- Acosta, C.A. (2009). *La herencia científica del exilio español en América. José Royo y Gómez en el Servicio Geológico Nacional de Colombia*. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Aristizábal, E. Hermelin, M. (2011). Propuesta de zonificación del suelo para la gestión del riesgo enfocada al ordenamiento territorial. *Gestión y Ambiente*, 14(2), 7-16.
- Beckinsale, R.P.; Beckinsale, R.D. (1989). Eustasy to plate tectonics: unifying ideas on the evolution of the major features of the earth's surface. *Binghamton Geomorphology Symposium 19*, Unwin Hyman.
- Botero-Arango, G. (1936). *Bosquejo de la paleontología de Colombia*. Tesis, Facultad Nacional de Minas.
- Botero-Arango, G. (1937). *Bosquejo de la paleontología colombiana*. 2da ed. Imprenta Nacional.
- Botero, G. (1940). Sobre el Ordoviciano de Antioquia. *Dyna*, 3(2), 89-96.
- Botero-Arango, G. (1942). Contribución al conocimiento de la petrografía del Batolito Antioqueño minería. *Minería*, 20(115-117), 9318-9330.
- Botero-Arango, G. (1943). El conocimiento del suelo y del subsuelo. *Minería*, 21(123-125), 9754-9756.
- Botero-Arango, G. (1963). Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales de la Facultad de Minas*, 57, 5-102.
- Boussingault, J.B. (1827). Sur la composition de l'or argentifère. *Annales de Chimie et de Physique*, 34, 408-419.

- Brimhall, G.H.; Dilles, J.H.; Proffett, J.M. (2006). The role of geologic mapping in mineral exploration. In: M.E. Doggett, J.R. Parry (eds.). *Wealth creation in the minerals industry: Integrating science, business, and education* (pp. 221-241). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/SP.12.11>
- Büdel, J. (1944). Die morphologischen Wirkungen des Eiszeitklimas im gletscherfreien Gebiet. *Geologische Rundschau*, 34(7-8), 482-519. <https://doi.org/10.1007/BF01803100>
- Büdel, J. (1969). Das System der klima-genetischen Geomorphologie. *Erdkunde*, 23(3), 165-183. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.1969.03.02>
- Büdel, J. (1982). *Climatic Geomorphology*. Princeton University Press.
- Buol, S.W.; Southard, R.J.; Graham, R.C.; McDaniel, P.A. (2011). *Soil Genesis and Classification*. John Wiley & Sons.
- Burbank, D.W.; Anderson, R.S. (2013). Tectonic geomorphology. *Environmental & Engineering GeoScience*, 19(2), 198-200. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.19.2.198>
- Castro, P.; Hermelin, M. (2003). Breve historia de la cartografía geológica en el Departamento de Antioquia, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 27(103), 245-261.
- Chorley, R.J.; Beckinsale, R.P.; Dunn, A.J. (1973). *The history of the study of landforms or the development of geomorphology*. Volume Two: The life and work of William Morris Davis. Methuen.
- Consejo de la Facultad de Minas. (1964). Resolución 19 de 1964.
- Dana, J.D. (1863). *Manual of geology, treating of the principles of the science, with special reference to American geological history, for the use of colleges, academies, and schools of science*. Theodore Bliss & Co. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.61162>
- Davies, G.L.H. (1989). On the nature of geo-history, with reflections on the historiography of geomorphology. *Binghamton Geomorphology Symposium 19*.
- De Greiff, C.S. (1857). *Mapa de la provincia de Antioquia en la Republica de Nueva Granada trazado de acuerdo con los más modernos reconocimientos*. Alexis Orgiazzi.
- Dean, D.R. (1989). James Hutton's rôle in the history of geomorphology. *Binghamton Geomorphology Symposium 19*.
- Departamento de Minas y Petróleos. (1937). *Estudios geológicos y paleontológicos sobre la Cordillera Oriental de Colombia*. P. & G. Gärtner.
- Duchaufour, P. (1953). La pédologie et ses applications dans les pays tropicaux. *Bulletin de La Société Des Sciences de Nancy*, 12(1), 19-22.
- Duchaufour, P. (1960). *Precis de pedologie*. Masson.
- Duchaufour, P. (1982). *Pedology*. George Allen & Unwin. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-6003-2>
- Duque-Palacio, S.; Seward, D.; Restrepo-Moreno, S.A.; García-Ramos, D. (2021). Timing and rates of morpho-tectonic events in a segment of the Central and Western cordilleras of Colombia revealed through low-temperature thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103085. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103085>
- Duque-Trujillo, J.; Bustamante, C.; Solari, L.; Gómez-Mafla, Á.; Toro-Villegas, G.; Hoyos, S. (2019). Reviewing the Antioquia batholith and satellite bodies: A record of Late Cretaceous to Eocene syn-to post-collisional arc magmatism in the Central Cordillera of Colombia. *Andean Geology*, 46(1), 82-101. <https://doi.org/10.5027/andgeov46n1-3120>
- Espinal, L.S. (1964). Formaciones vegetales del departamento de Antioquia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 24(60), 1-81.
- Etayo-Serna, F. (2007). Profesor Gerardo Botero Arango y la paleontología de Colombia. Intento de aproximación a las razones de su obra. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 22, 11-14.

- Feininger, T. Botero, G. (1982). The Antioquian Batholith, Colombia. *Publicación Geológica Especial de Ingeominas*, 12, 1-50.
- García, C.; Hermelin, M. (2004). Cálculo preliminar de la tasa de meteorización del Batolito Antioqueño, Cordillera Central, Colombia. *Revista Brasileira de Geomorfología*, 5(1), 43-53. <https://doi.org/10.20502/rbg.v5i1.31>
- Geikie, A. (1882). *Text-book of Geology*. Macmillan.
- Gómez, J.D.; De la Cuesta, S.; Hermelin, M. (1970). Mineralogía de las arcillas y análisis químico de los suelos de Urabá, “plano aluvial A”. Universidad Nacional de Colombia.
- González, M. (1983). Reseña histórica de la Facultad de Agronomía de Medellín. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 37(1), 7-16.
- Gould, J. (1983). Hutton’s purpose. In: *Hen’s teeth and horse’s toes*. Norton.
- Grosse, E. (1926). *Estudio geológico del Terciario carbonífero de Antioquia, en la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia, entre el río Arma y Sacaoyal*. Dietrich Reimer (Ernst Vohsen).
- Gupta, A. (2011). *Tropical geomorphology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511978067>
- Hack, J. (1975). *Dynamic equilibrium and landscape evolution* (pp. 87-102). In: W.M. Melhorn and R.C. Flemal (eds).
- Hermelin, M. (1965). Estudio preliminar sobre la descomposición de algunas rocas del batolito antioqueño. Tesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Hermelin, M. (1975). Bases para un estudio geomorfológico del departamento de Antioquia. *Publicación Especial Geología*, 5.
- Hermelin, M. (1976). Bases para un estudio geomorfológico de Antioquia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 1, 49-76.
- Hermelin, M. (1978). La geología en la sede de Medellín de la Universidad Nacional: un punto de vista. *Dyna*, 95, 13-19.
- Hermelin, M. (1979). La geología ambiental: una necesidad para Colombia. *Boletín de Vías*, 7(43), 23-35.
- Hermelin, M. (1984). Aprovechamiento de los depósitos volcánicos cuaternarios en el estudio y el manejo de cuencas. *Ier Seminario Latinoamericano sobre Presas y Embalses*. Bogotá.
- Hermelin, M. (1987). *Bases de geología ambiental*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hermelin, M. (1988). Geografía física de Antioquia. In: J.O. Melo (ed.). *Historia de Antioquia* (pp. 13-22). Suramericana de Seguros.
- Hermelin, M. (1990a). Geología y medio ambiente en Colombia: un balance. *Revista Universidad Eafit*, 26(80), 45-54.
- Hermelin, M. (1990b). Un método de zonificación geotécnica para poblaciones. *VI Jornadas Geotécnicas*. Bogotá.
- Hermelin, M. (2006). Riesgos y amenazas de origen natural. In: *Geografía de Antioquia* (pp. 185-193). Fondo Editorial EAFIT-Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Hermelin, M. (2011). *Algunas reflexiones personales* (p. 6).
- Hermelin, M. (2013). Nodo colombiano de geomorfología. Plan estratégico para el desarrollo de la geomorfología en Colombia. *XIV Congreso Colombiano de Geología, IV Seminario de Geomorfología*. Medellín
- Hess, H. H. (1962). History of Ocean Basins. In: A.E.J. Engel, H.L. James, B.F. Leonard (eds.). *Petrologic studies* (pp. 599-620). Geological Society of America. <https://doi.org/10.1130/Petrologic.1962.599>
- Holdridge, L.-R. (1947). Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 105(2727), 367-368. <https://doi.org/10.1126/science.105.2727.367>
- Hoyos, N.; Hermelin, M. (2002). Natural Hazard mapping in small urban areas, Antioquia, Colombia. In: P.T. Bobrowsky (ed.). *Geoenvironmental mapping: methods, theory and practice* (pp. 387-409). CRC Press.

- Huggett, R. (2011). *Fundamentals of geomorphology*. 3rd ed. Routledge. del río Medellín, cordillera central (Antioquia, Colombia). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 27(102), 71-84.
- Hutton, J. (1795). *Theory of the Earth, with proofs and illustrations*.
- Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation - a system of quantitative pedology*. McGraw-Hill.
- Keller, W.D. (1957). *The principles of chemical weathering: an integrated review of the principles of chemical weathering as taken from the literature, and the relation of weathering to certain aspects of geology, pedology and civilization*. Lucas Bros.
- Kimiya, K. (1982). Physical, chemical and mineralogical properties of weathering crust of granitic rocks distributed in Antioquia, Colombia. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 23(2), 76-82. <https://doi.org/10.5110/jjseg.23.76>
- Köppen, W. Pérez, H. (1948). *Climatología: Con un estudio de los climas de la Tierra*. Fondo de Cultura Económica.
- Laverde, J.R. (1940). General Pedro Nel Ospina. *Repertorio Histórico de La Academia Antioqueña de Historia*, 14(146), 501-504.
- McDonald, D.; Hunt, L.B. (1982). *A history of platinum and its allied metals*. Johnson Matthey.
- Mohr, E.C.J.; van Baren, F.A. (1954). *Tropical soils: a critical study of soil genesis as related to climate, rock and vegetation*. W. Van Hoeve.
- Murray, P.S. (1997). *Dreams of development: Colombia's National School of Mines and its Engineers, 1887-1970*. The University of Alabama.
- Nagelschmidt, G. (1944). *The mineralogy of soil colloids*. Imperial Bureau of Soil Science.
- Nesbitt, H.W.; Young, G.M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885), 715-717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Osorio, J.C.; López-Rendón, J.E.; Hermelin, M. (2003). Balance geoquímico para la cuenca alta del río Medellín, cordillera central (Antioquia, Colombia). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 27(102), 71-84.
- Ospina-Vásquez, T. (1911). *Reseña sobre la geología de Colombia y especialmente del antiguo departamento de Antioquia*. Imprenta de la Organización.
- Osterkamp, W.R. (1989). A tribute to John Hack by his friends and colleagues. *Binghamton Geomorphology Symposium 19*.
- Osterkamp, W.R. Hupp, C.R. (1993). Memorial to John T. Hack 1913-1991. *Memorials - Geological Society of America*, 23, 59-61.
- Parker, A. (1970). An index of weathering for silicate rocks. *Geological Magazine*, 107(6), 501-504. <https://doi.org/10.1017/S0016756800058581>
- Patarroyo, P. (2006). Pregrado de Geología - 50 Años (1956 – 2006). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. *Geología Colombiana*, 31, 131-132.
- Pedro, G. (1964). Contribution à l'étude expérimentale de l'alteration géochimique des roches cristallines. *Annales Agronomiques*, 15(2-4), 88-90.
- Posada, J. de la C. (1913). Notas sobre la formación carbonífera de Amagá. *Anales de la Escuela Nacional de Minas*, 5, 286-288.
- Posada, J. de la C. (1936). Bosquejo geológico de Antioquia. *Anales de la Escuela Nacional de Minas*, 38, 1-51.
- Restrepo, V. (1888). *Estudio sobre las minas de oro y plata de Colombia*. Impr. de Silvestre y Compañía.
- Restrepo-Moreno, S.A.; Foster, D.A.; Bernet, M.; Min, K.; Noriega, S. (2019). Morphotectonic and orogenic development of the Northern Andes of Colombia: A low-temperature thermochronology perspective. In: F. Cediél, R.P. Shaw (eds.). *Geology and tectonics of Northwestern South America: The Pacific-Caribbean-Andean Junction* (pp. 749-832). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_11)



- Riehl, H. (1954). *Tropical Meteorology*. Mc Graw-Hill.
- Rodríguez-Vega, Y.J. (2008). Gerardo Botero: Memoria y espíritu científico en la Facultad de Minas. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 22, 15-26.
- Salazar, S.; Ochoa, A.; McCarthy, P.J. (2023). How the visit of pedologist Hans Jenny to Colombia (1946–1947) contributed to the theory of soil-forming factors. *Geoderma*, 437, 116575. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116575>
- Sánchez, P.A. (2019). *Properties and Management of Soils in the Tropics*. Cambridge University Press.
- Scheibe, R. (1927). *Croquis geológico del Sur de Antioquia levantado por el doctor Robert Scheibe 1919*. Gisaldruck d. Lith. Anst. v. Bogdan Gisevius.
- Scheibe, R. (1933). Geología del Sur de Antioquia. In: *Compilación de estudios geológicos oficiales en Colombia I* (pp. 97-167). Imprenta Nacional.
- SPH. (1838). Localidad nativa de la platina. In: *Memorias de la Sociedad Patriótica de La Habana. Tomo VI* (pp. 400-401).
- Steno, N.; Winter, J.G. (1916). *The prodromus of Nicolaus Steno's dissertation concerning a solid body enclosed by process of nature within a solid; an English version with an introduction and explanatory notes*. The Macmillan company. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.54340>
- Thomas, M. (1974). *Tropical geomorphology a study of weathering and Landform development in warm climates*. John Wiley & Sons.
- Tinkler, K.J. (1985). *A short history of geomorphology*. Croom Helm.
- Tinkler, K.J. (1989). Worlds Apart: eighteenth century writings on rivers, lakes and the terraqueous globe. *Binghamton Geomorphology Symposium 19*.
- Toro, G. Hermelin, M. (1993). Stratigraphy of volcanic ashes from Southern Antioquia, Colombia: Possible climatic implications. *Quaternary of South America and Antarctic. Peninsula*, 8, 201-217.
- Trewartha, G.T. (1943). *An introduction to weather and climate*. McGraw-Hill.
- Trojer, H. (1954). El tiempo reinante en Colombia, sus características y su desarrollo. Estudios básicos para una climatología dinámica de Colombia. *Boletín Técnico Cenicafe*, 2(13), 1-43.
- Vageler, P.; Greene, H. (1933). *An Introduction to Tropical Soils*. MacMillan. Trad.
- Villegas-Botero, L.J. (2015). *La Facultad de Minas 1970 – 2012*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Vondráčková, T.; Škoda, S.; Vlček, J. (2015). The Negative Impact of Endogenous Factors on the Foundation Soil of Buildings. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 49-53. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.014>
- Wegener, A. (1912). Die Entstehung der Kontinente. *Geologische Rundschau*, 3(4), 276-292. <https://doi.org/10.1007/BF02202896>
- Wirthmann, A. (2000). *Geomorphology of the tropics*. Springer Berlin, Heidelberg.

---

---

Fecha de recibido: 10 de julio de 2023

Fecha de aceptado: 18 de marzo de 2024

---

---