



# El reloj de la Tierra

Paisajes geológicos de Santander



Vista aérea del Cañón del Chicamocha, sector vereda El Embudo, municipio de Guaca.

# El reloj de la Tierra

## Paisajes geológicos de Santander

Universidad Industrial de Santander

### Dirección científica

Luis Carlos Mantilla Figueroa  
Profesor, Escuela de Geología

### Coautoría editorial

#### Profesores, Escuela de Geología

Francisco Alberto Velandia Patiño

Jairo Clavijo Torres

Luis Enrique Cruz Guevara

Jesús Hernando Mendoza Forero

Sait Khurama Velásquez

Mario García González

Giovanny Jiménez Díaz

Carlos Alberto García Ramírez

Jorge Eduardo Pinto Valderrama

Carlos Alberto Ríos Reyes

Rocío del Pilar Bernal Olaya

Juan Diego Colegial Gutiérrez

### Dirección creativa y fotografía

César Mauricio Olaya Corzo  
Comunicador social - periodista

### Fotografías dron

María Rosana Báez Rodríguez, geóloga

Víctor Zambrano Mendoza, productor audiovisual

### Coordinación general

Johanna Inés Delgado Pinzón  
Protocolo, Rectoría UIS

### Edición

Puno Ardila Amaya

Jefe, División de Publicaciones UIS

© Universidad Industrial de Santander  
Reservados todos los derechos

ISBN: 978-958-52859-1-0

Primera edición, diciembre de 2020

### Diseño y diagramación:

Olfi Studio S. A. S.

### Ilustraciones:

Pedro Méndez / Olfi Studio



Los primeros destellos de la mañana desvelan la majestuosidad de nuestro territorio. Delineada sobre la luz que se irradia en miles de tonos, de metafórica relación con el despertar de los tiempos, se aprecia la Cordillera de los Andes, sistema montañoso que atraviesa a Suramérica, que en sus líneas de estratos inclinados conforma la serranía donde se localiza el páramo de Almorzadero, con sus reductos geológicos que revelan más de 50 millones de años de historia geológica, desde las más antiguas (Neoproterozoico) del basamento cristalino de rocas metamórficas e ígneas hasta las sedimentarias del Paleógeno.

### Edición e impresión:

División de Publicaciones UIS  
Carrera 27 calle 9, ciudad universitaria  
Bucaramanga, Colombia  
Tel.: (7) 6344000, ext. 1602  
ediciones@uis.edu.co

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio, sin autorización escrita de la UIS.

Impreso en Colombia – Printed in Colombia

# El reloj de la Tierra

## Paisajes geológicos de Santander

Universidad  
Industrial de  
Santander







## CONSEJO SUPERIOR

**Mauricio Aguilar Hurtado**

Gobernador de Santander  
Presidente del Consejo Superior

**Pendiente de designación**

Representante del presidente de la República de Colombia

**Jorge Enrique Celis Giraldo**

Delegado de la ministra de Educación Nacional

**Miguel José Pinilla Gutiérrez**

Representante de los exrectores

**Alejandro Almeida Camargo**

Representante del sector productivo

**Mario Humberto Torres Macías**

Representante de los egresados

**Fabio Bolívar Grimaldos**

Representante de las directivas académicas

**Luis Orlando Aguirre Rodríguez**

Representante de los profesores

**María Alejandra Aguilera Blanco**

Representante de los estudiantes





## CONSEJO ACADÉMICO

**Hernán Porras Díaz**

Rector y representante legal  
Presidente del Consejo Académico

**Orlando Pardo Martínez**

Vicerrector académico

**Dionisio Antonio Laverde Cataño**

Vicerrector de Investigación y Extensión

**Gerardo Latorre Bayona**

Vicerrector administrativo

**Sofía Pinzón Durán**

Secretaria general

**Johann Farith Petit Suárez**

Decano, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

**Sandra Judith García Vergara**

Decana, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

**José David Sanabria Gómez**

Decano, Facultad de Ciencias

**Fabio Bolívar Grimaldos**

Decano, Facultad de Salud

**Ana Cecilia Ojeda Avellaneda**

Decana, Facultad de Ciencias Humanas

**Germán García Vera**

Director Instituto de Proyección Regional  
y Educación a Distancia - IPRED

**Clara Isabel López Gualdrón**

Representante de los directores de escuela

**Carlos Borrás Pinilla**

Representante de los profesores

**José Hilario Argüello Lamus**

Representante de los estudiantes

**Daniel Alfonso Sierra Bueno**

Director de Planeación





Tierras de los "patiamarillas" en proximidades a Guane.



Y en cada roca habrá luz,  
una luz que viene de más allá  
de los tiempos, una luz que  
evidencia la historia misma,  
un registro que nos dice que el  
planeta Tierra, nuestro planeta  
Tierra, va más allá de nuestra  
propia existencia.



**1** La Tierra:  
un planeta vivo  
Pág. 27

**2** Geología de Colombia y del  
departamento de Santander  
Pág. 99

**3** Paisajes geológicos  
de Santander  
Pág. 119

**CONTENIDO**



# Presentación



## El reloj de la Tierra

### El paisaje descifrado, las huellas del tiempo

No sé si pueda sonar exagerado partir de esta premisa, pero lo hago desde la perspectiva que a cada quien le brinda el pasaporte de la resurrección de los recuerdos. Comienzo entonces evocando dos libros que siempre sobresalían entre el pesado conjunto de elementos que, a diario, trasladábamos dentro del maletín escolar: el *Álgebra de Baldor* y, como dirían nuestros vecinos caribeños, el “tamañudo” atlas, compendios que debíamos preservar incólumes, pues pasarían a ser heredados por quienes seguían nuestros pasos en el combo familiar.

El atlas no solo era voluminoso en sus grandes dimensiones; lo era también en su capacidad para despertarnos el deseo por conocer un mundo más allá de nuestros imaginarios, que a veces complementábamos con la lectura de las extraordinarias historias de Julio Verne en sus *Veinte mil leguas de viaje submarino*, *La vuelta al mundo en ochenta días*, *Viaje al centro de la Tierra*, entre muchas otras. Era un mundo que se traducía en mapas, en relieves, en representaciones de cimas montañosas y depresiones del fondo oceánico y que, fundamentalmente, se convertía en una especie de catalejo a través del cual mirábamos con el deseo de, algún día, poder estar frente a frente ante tanta maravilla allí resguardada.

Con el tiempo muchos tuvimos la fortuna de viajar a algunas de esas geografías que vimos representadas en el atlas; unos pocos trascendimos fronteras patrias y otros, tan igual de afortunados, nos adentramos en nuestro país para recorrer las montañas, los océanos y los extensos valles; pero siempre con la certeza de encontrar alguna correspondencia con lo aprendido en las clases de geografía, en una relación íntima entre el saber y el ver, corroborando, como sabiamente sostenía García Márquez, que la realidad supera la mayor de las ficciones.

En ese atlas identificamos que nuestro departamento de Santander se localiza en las estribaciones de la Cordillera Oriental, y que junto con la Cordillera Central, rasgada por el paso silente del Río Grande de la Magdalena, conforman un inmenso valle donde el color y el calor son sus

protagonistas. Reconocimos que, sobre el filo de la cordillera, contamos con uno de los fenómenos más extraordinarios de la topografía nacional, el Cañón del Chicamocha. Aprendimos sobre los pisos térmicos y ratificamos que nuestra comarca se ubica en un territorio privilegiado, pues los tiene casi todos, con excepción de las llamadas nieves perpetuas.

Pero todo ese saber, dibujado o esquematizado en el atlas, se queda corto ante la experiencia de estar frente a cualquiera de esos puntos que llamaron la atención en nuestra época de estudiante. Sin necesidad de ir demasiado lejos, quién no ha sentido ese extraordinario llamado de la Tierra al observar con temor y respeto, desde el Alto de Chiflas, el transcurrir del río por el maravilloso Cañón del Chicamocha; quién no ha vivido la necesidad de retratarse frente a un gigantesco frailejón, ya fuese que estuviera ubicado en el páramo de Santurbán o en el páramo de Almorzadero. Cómo no dejar fluir el sentimiento que nos hace trópico al admirar un rojizo atardecer frente al río Magdalena en Barrancabermeja, cómo evitar quedar extasiado ante el fenómeno de montañas rotas que conforma el Valle Medio del río Sogamoso a la altura de Zapatoca, e intentar volvernos criollos y caminar descalzos por tierras baricharas hasta quedar “patiamarillos”.


Más allá de la información y de los sentimientos que nos proveen nuestros sentidos, cuando estamos frente a frente con el paisaje y lo confrontamos con los saberes adquiridos a través de las páginas del atlas de nuestros tiempos escolares, es claro que aún subyace una historia desconocida: la historia de los porqués, la historia de los tiempos, la que nos marca el reloj de la Tierra; aquella que los profesionales de la geología se han encargado de estudiar, a partir de los vestigios o las huellas rasgadas en el territorio con el paso de los siglos, convertidas ahora en una serie de transformaciones internas cíclicas, que por miles de años han hecho la labor de escultores y alfareros de esos horizontes que hoy nos obnubilan.

Los enigmáticos y exuberantes paisajes geológicos de Santander motivaron la realización de este proyecto editorial de la UIS, que terminó asumiendo el sugestivo título de *El reloj de la Tierra*, cuyo objetivo coincide con el espíritu sembrado en libros anteriores, de poner sobre la palestra del conocimiento público lo que muchos califican como saberes sacros de expertos y académicos, para volverlos un tanto más “digeribles”, al

desarrollarlos con un lenguaje sencillo, accesible a todos, y acompañarlos con el extraordinario poder de la imagen fotográfica artística con la que el comunicador social César Mauricio Olaya Corzo suele sorprendernos, y propiciar así el ancla de la mirada para invitarnos a leer el juicioso y delicado trabajo realizado por un destacado grupo de profesores de la Universidad Industrial de Santander, adscritos a la Escuela de Geología, bajo la batuta del profesor Luis Carlos Mantilla Figueroa.

Este, definitivamente, es un libro de historia, de la historia de la Tierra, de nuestros paisajes, de las huellas dibujadas, tanto en el paisaje exterior como en sus inaccesibles profundidades. Este es un libro para enamorarnos más de nuestro Santander, un libro elaborado, desde la UIS que queremos, con todo el cariño y el compromiso que cabalmente observamos por nuestro departamento y toda nuestra gente.

Los invitamos a disfrutar sus páginas y a emprender este recorrido visual por Santander.



Hernán Porras Díaz  
Rector



Laguna de Páez en cercanías del municipio de California.



# Presentation

## The Earth's clock

### Landscape deciphered, the tracks of time

Perhaps this may sound as an exaggeration, but I do it from the perspective given by the license of memories resurrected. I begin by remembering two books that always outstood among the heavy set of items we carried daily in our bookbags: Baldor's Algebra and as our neighbors in the Caribbean region say, a *tamañudo* (humongous) atlas. We had to preserve those volumes intact because they would be inherited by those following our footsteps in the family.

The atlas was not only large in its dimensions; it was also huge in its ability to awaken in us the desire to see a world beyond our imaginations, which we often complemented with the reading of the extraordinary stories by Jules Verne in his *Twenty Thousand Leagues Under the Seas*, *Around the World in Eighty Days*, *Journey to the Center of the Earth*, among many others. It was a world that was translated into maps, reliefs, representations of mountain tops and depressions on the ocean floor which basically became a sort of spyglass through which we watched, with the desire that maybe someday we could visit the wonders pictured there.

As time went by, many of us were fortunate enough to travel to some of those geographies we saw represented in the atlas; a few of us transcended national borders and others, so fortunate, went into our country to tour the mountains, the oceans and the extensive valleys; but always with the certainty of finding some correspondence with what we had learned in geography classes, in an intimate relationship between knowing and seeing, corroborating that reality exceeds the best of fictions, as Gabriel García Márquez said wisely.

In this atlas we identify that our department of Santander is located in the slopes of the Eastern Cordillera, and that together with the Central Cordillera, torn by the silent passage of the Río Grande de la Magdalena, form an immense valley where color and heat are its protagonists. We recognized that, on the edge of the mountain range, we have one of the most extraordinary natural features of the national topography, the

Chicamocha Canyon. We learned about the thermal floors and confirmed that our region is located in a privileged territory, since it has almost all of them, except for the so-called perpetual snows.

But all this knowledge, drawn or sketched in the atlas, is poor compared with the experience of being in front of any of those spots that caught our attention in our days as students. Without the need of going too far, who has felt that extraordinary call of the earth by observing with fear and respect, from the Alto de Chiflas, the passage of the river through the wonderful Chicamocha Canyon? Who has felt the need to take a self-portrait in front of a gigantic *frailejon* either in the *Páramo de Santurbán* (tropical moorland of Santurban) or in *Páramo de Almorzadero*? Who has felt the tropic flowing through his veins when contemplating a reddish sunset on the Magdalena river in Barrancabermeja? How does one keep from being in ecstasy when seeing the broken mountains that form the middle valley of the Sogamoso river near the town of Zapatoca, and try to become *criollos* by walking barefoot on the *baricharas* land until our feet take the yellowish color of the soil, thus getting the nickname of *patiamarillos*?

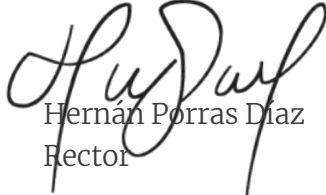
Beyond the information and the feelings that our senses convey, when we are face to face with the landscape and we confront it with the knowledge acquired through the pages of the atlas in our school days, it is clear there is still an unknown history: the history of whys, the history of times that the earth clock tells us. That history that the professionals of geology have been in charge of studying from the vestiges or the torn tracks left in the territory by the passage of centuries, now turned into a series of internal cyclic transformations that for thousands of years have done the work of sculptors and potters of those horizons that dazzle us nowadays.

The enigmatic and exuberant geological landscapes of Santander motivated the realization of this editorial project from the UIS, which ended up assuming the suggestive title of *The Earth's Clock*, whose objective coincides with the spirit sown in previous books: to bring to public knowledge what many qualify as sacred wisdom of experts and academics, to make it somewhat more "palatable" by developing it with a simple language, accessible to all, and to accompany it with the extraordinary power of

artistic photography with which the social communicator César Mauricio Olaya Corzo usually surprises us. The result invites to set our gaze and read the judicious and delicate work done by an outstanding group of professors from the School of Geology of Universidad Industrial de Santander, under the leadership of Professor Luis Carlos Mantilla Figueroa.

This is definitely a book of history; of the history of the earth, of our landscapes, of the traces drawn, both in the external landscape and in its inaccessible depths. A book to fall more in love with our Santander, and a book made, from the UIS we want, with all the fondness and commitment that we fully observe by our department and all our people.

We invite you to enjoy its pages and to undertake this visual journey through Santander.



Hernán Porras Díaz  
Rector



Paisaje del Chicamocha, en la vereda Las Aguadas del municipio de Aratoca.



Madresolas del Chicamocha en cercanías de Cepitá.



## Introducción

Nuestro planeta Tierra es en sí mismo un libro en cuyas rocas como páginas es posible leer la historia del origen de la vida e incluso de un tiempo anterior a ella. La Universidad Industrial de Santander, por medio de la Escuela de Geología y de un grupo editorial especializado, se ha propuesto desentrañar los secretos del territorio santandereano como un aporte a la difusión del conocimiento para la sociedad.

*El reloj de la Tierra: paisajes geológicos de Santander* es un libro dirigido a cualquier lector interesado en conocer el significado de algunos paisajes del departamento de Santander, desde el punto de vista de su historia geológica. También es un documento de consulta para aficionados, entusiastas y estudiosos de esta casa común: nuestro planeta azul.



Formaciones en el valle del río Servitá, rumbo a Capitanejo.

La Tierra es el cuerpo planetario más estudiado de todo nuestro universo, y su conocimiento es y será la base para entender la formación y la evolución de otros mundos dentro y fuera de nuestro sistema solar. Nuestro planeta es un cuerpo dinámico cuyo aspecto exterior se renueva de manera permanente como respuesta a la interacción de los procesos internos y externos. Por esta razón, la fisiografía de nuestro territorio y de nuestro planeta no es más que la expresión actual de esa extensa sucesión de eventos geológicos que constantemente modifican y rediseñan nuestro hogar planetario.

En ese sentido, este libro se ha organizado de tal modo que el lector pueda profundizar en la historia geológica regional sin desvincularse

del contexto planetario. Así, la primera parte presenta algunas de las generalidades de la Tierra. En seguida, se ofrece una síntesis de la evolución geológica de Colombia y Santander. Luego se expone brevemente la historia geológica contenida en los diferentes paisajes de la accidentada geografía de nuestro departamento. Más adelante, se explican las causas que hacen de Santander una tierra de temblores, y, finalmente, se aborda la función social de la geología.

Los paisajes geológicos se conciben como ventanas de tiempo que develan información sobre los diferentes eventos que han tenido lugar a lo largo de la evolución geológica de nuestro



La historia de la Tierra se escribe a diario, y el saber que le proporciona a sus estudiosos se puede leer en cada roca, en cada segmento, en cada línea dibujada en su corteza.

territorio y de nuestro planeta. Esta información, a su vez, es la base para planificar y proyectar el desarrollo futuro de nuestra sociedad. Por esta razón, la geología es una ciencia que contribuye a descubrir el pasado ignoto de nuestro planeta, con el objetivo de construir sobre esta base nuestro futuro.

Este paseo por los paisajes geológicos de Santander es literalmente un viaje al centro de la Tierra —como en la novela del visionario Julio Verne—, donde, acompañados por el saber y la experticia de los geólogos, descubriremos los secretos que conservan las rocas, las montañas y otras formas de expresión de nuestro territorio. Podremos

conocer las historias que han quedado guardadas en el tiempo, a partir de la voz misma del paisaje, que nos habla con un lenguaje espontáneo y natural.

Con estos elementos introductorios al saber de los geólogos, iniciaremos este viaje por Santander, haciendo uso del recurso visual, para asomarnos al paisaje, y desde él comenzar a leer la historia más allá del pasado. Al finalizar las páginas de este libro, los lectores habrán podido conocer el departamento de Santander de una manera más profunda, apreciándolo en cada pliegue de sus accidentes geográficos y en la riqueza de sus recursos naturales.



Volúmenes, formas, colores, profundidades, alturas, conjugación de dimensiones que conforman la biblioteca terráquea de un planeta vivo que tiene mucho para contar.



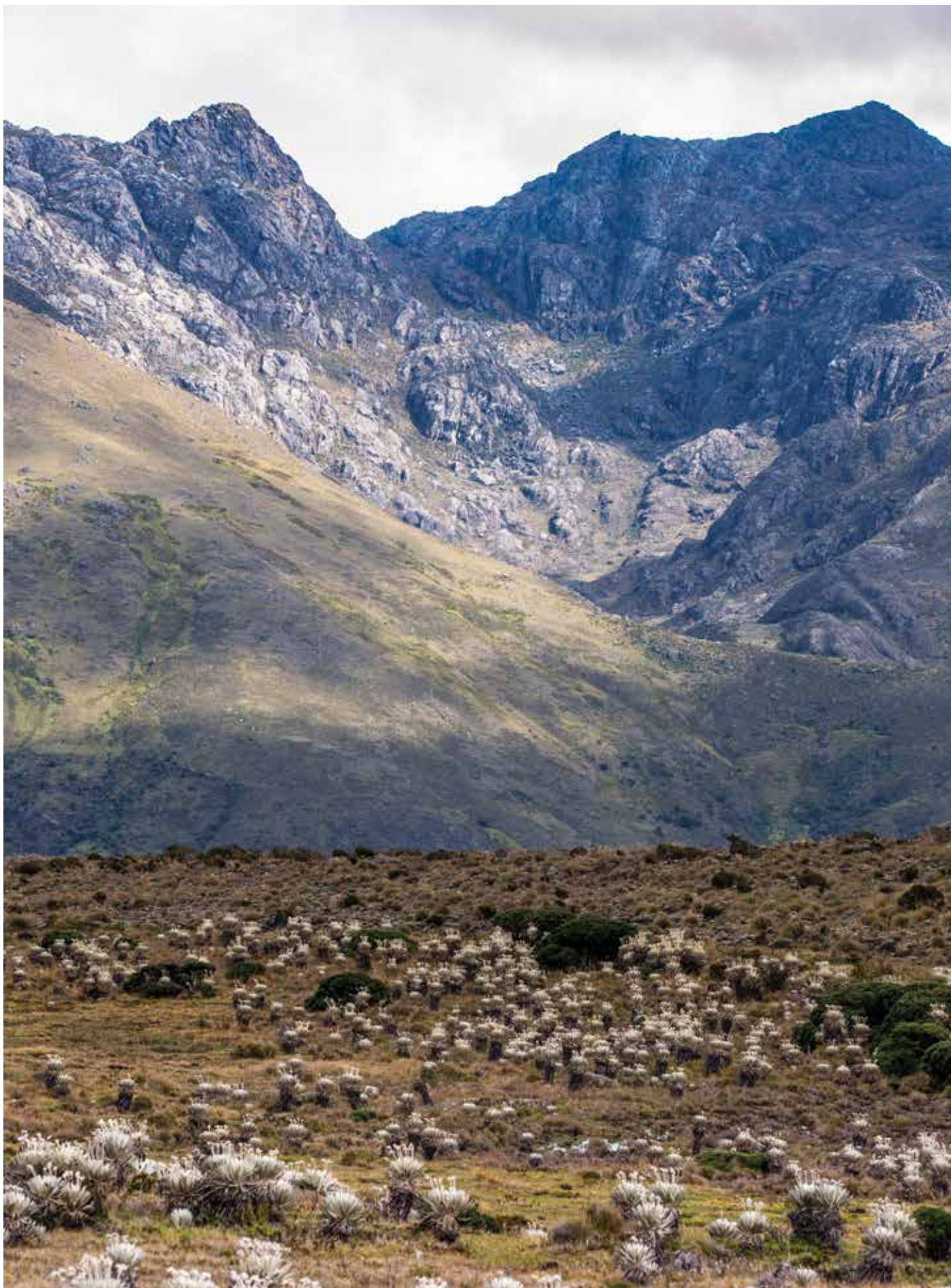
Tierra de los Siete Colores, en Betulia.



Playones del río Chicamocha en el corregimiento San Francisco del municipio de Cepitá.



Cañón del Sogamoso cerca de Zapatoca.



Páramo de Santurbán en cercanías del complejo lagunar de Las Cuntas.



Ocaso sobre el océano Atlántico.



# 1 La Tierra: un planeta vivo

---

**N**uestro planeta, nuestra casa, nuestro mundo, es un territorio vivo, es decir, es un cuerpo en permanente transformación. Los procesos geológicos, tanto internos como externos, son los que han permitido que el planeta desarrolle y mantenga activo su sistema de reciclaje natural global, que se conoce como *tectónica de placas litosféricas*. Este concepto suele ser muy citado en diferentes medios de comunicación para explicar aquellos fenómenos naturales que se convierten en temas mediáticos a causa de sus fuertes impactos sobre los ecosistemas, pero cuyo verdadero papel global, por ejemplo, en el ciclo de los elementos y en el origen y la evolución de la vida, es relativamente poco comprendido.



Interior de la mina de San Antonio en California.

Ya sea dentro de la Tierra o emergiendo de ella, hay un espectáculo esperando para sorprender a quien detenga la mirada un instante en torno a los paisajes que se multiplican a lo largo del planeta azul.



La Ciudad de Piedra, en San José del Guaviare.



Caño Cristales, La Macarena, Meta.

Si resaltáramos las diferencias entre la Tierra y los demás planetas de nuestro vecindario solar, con toda seguridad, lo primero que diríamos es que nuestro mundo alberga agua y vida. Sin embargo, existen otras particularidades igualmente importantes, considerando que en él podrían estar las bases del desarrollo de la vida y, en cierto modo, las del reciclaje natural de los materiales terrestres. Otra característica que distingue a nuestro planeta de otros es la abundancia de rocas graníticas, de aspecto granular y de colores claros, que conforman los continentes.

Sin duda alguna, otra particularidad de nuestro planeta es que cuenta con un sistema de reciclaje natural global al que ya nos hemos referido: la tectónica de placas litosféricas. Este sistema es fundamental para definir nuestro mundo como un “planeta vivo”, dado que su dinámica permite la renovación permanente de la superficie terrestre y favorece las transiciones que experimentan los materiales rocosos a lo largo del tiempo geológico. Si no existiera la tectónica de placas litosféricas, nuestro planeta se habría convertido en una masa de roca inactiva, desde el punto de vista tectónico; es decir, sería un “planeta muerto”, como es Marte en la actualidad.

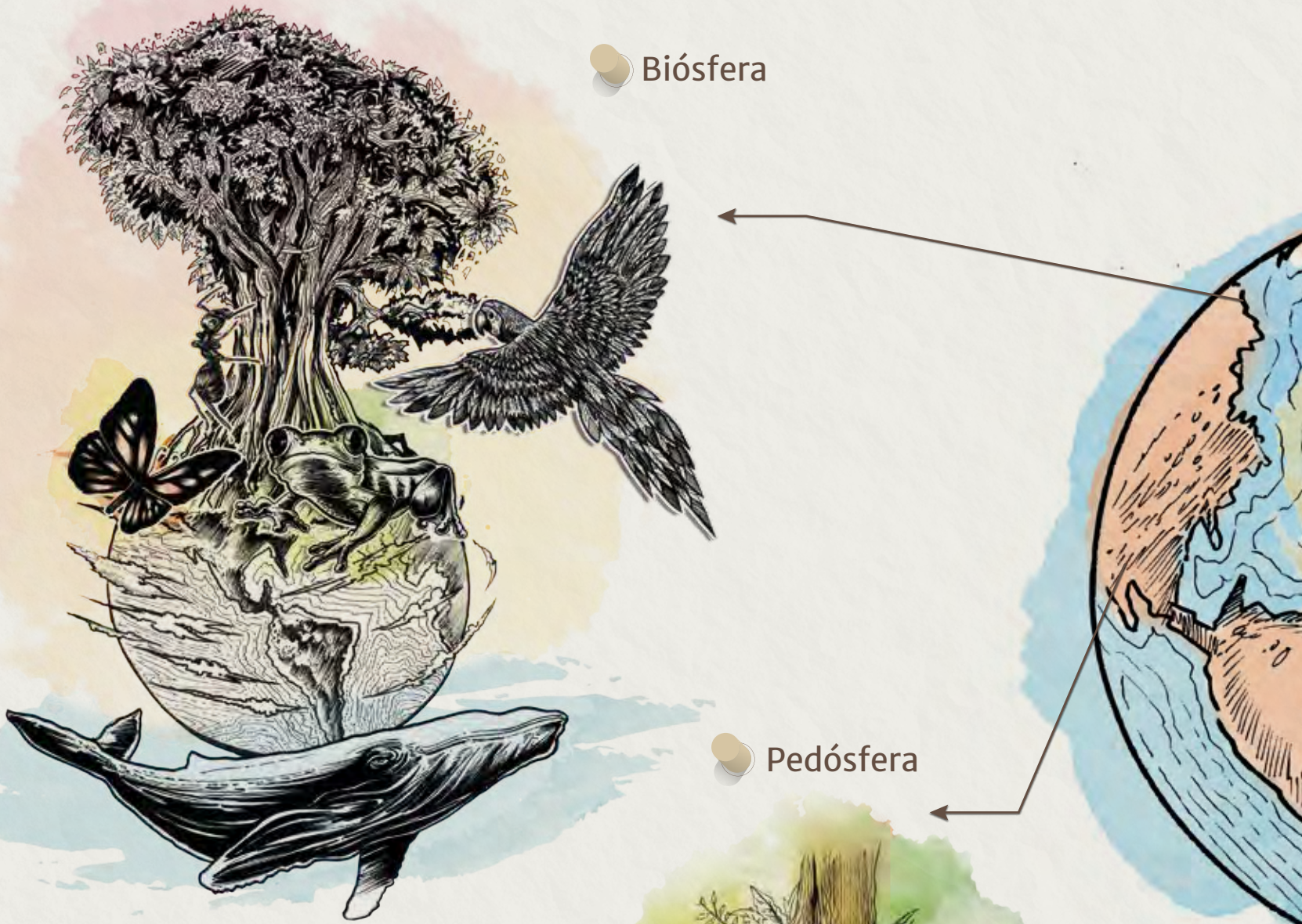
La Tierra se concibe como un sistema que se compone, al menos, de seis capas o esferas: la geósfera, que abarca las rocas existentes desde la superficie terrestre hasta el centro del núcleo de nuestro planeta; la pedósfera, que comprende los suelos; la hidrósfera, que incluye, entre otros, los ríos, los mares, los océanos y los lagos; la biósfera, que identifica la zona donde se encuentran los seres vivos; la antropósfera, que es la parte del planeta donde se desarrolla la vida del hombre; y la atmósfera, que se extiende hacia arriba unos 10.000 kilómetros desde la superficie terrestre (véase la figura 1).



Formaciones por efecto de las corrientes hídricas en geografías del departamento de Guaviare.

El agua es protagonista de muchas de las transformaciones que se dibujan sobre la superficie terrestre. En su dinámica, va transformando todo a su paso y va dejando la huella indeleble de su obra escultórica.

# Planeta [sistema] Tierra



A partir de lo anterior, y con el fin de asegurar la ampliación de la idea expresada en el título de esta primera parte del libro, “La Tierra: un planeta vivo”, a continuación, se presentarán algunas generalidades sobre nuestro planeta. En los capítulos que siguen se abordan, en orden, temas como la formación del planeta Tierra, su estructura interna, sus procesos endógenos y exógenos; la tectónica de placas y el ciclo de Wilson; los minerales, las rocas y los fósiles; y, finalmente, el tiempo geológico.

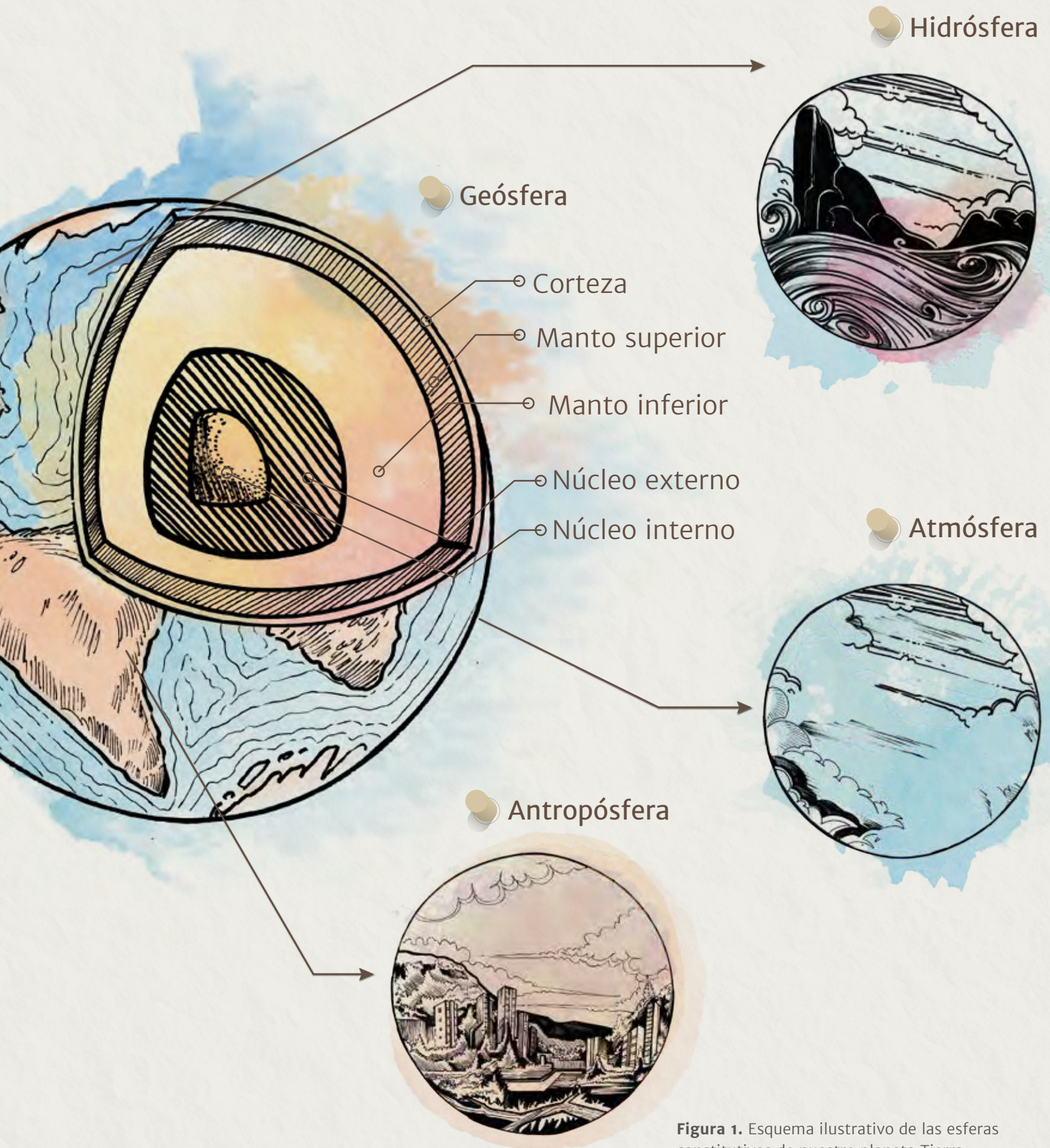


Figura 1. Esquema ilustrativo de las esferas constitutivas de nuestro planeta Tierra



## La formación del planeta Tierra

Nuestro planeta es el resultado de su historia termal y de la evolución de los materiales primordiales que lo formaron hace unos 4540 millones de años. La célebre frase «somos polvo de estrellas», acuñada por el gran divulgador científico Carl Sagan, posiblemente sea la mejor expresión para referirnos al origen de nuestro planeta y a todo lo que en él existe. Se considera que los materiales primordiales que formaron nuestro actual planeta azul y el sistema solar, en general, son residuos de ese proceso continuo de nacimiento y muerte de estrellas. La muerte de una estrella es, a su vez, también, un ambiente favorable para la formación de elementos más pesados que sus elementos constitutivos, como el hidrógeno y el helio. A este proceso de formación de elementos más pesados a partir de núcleos de elementos más ligeros se lo denomina nucleosíntesis.

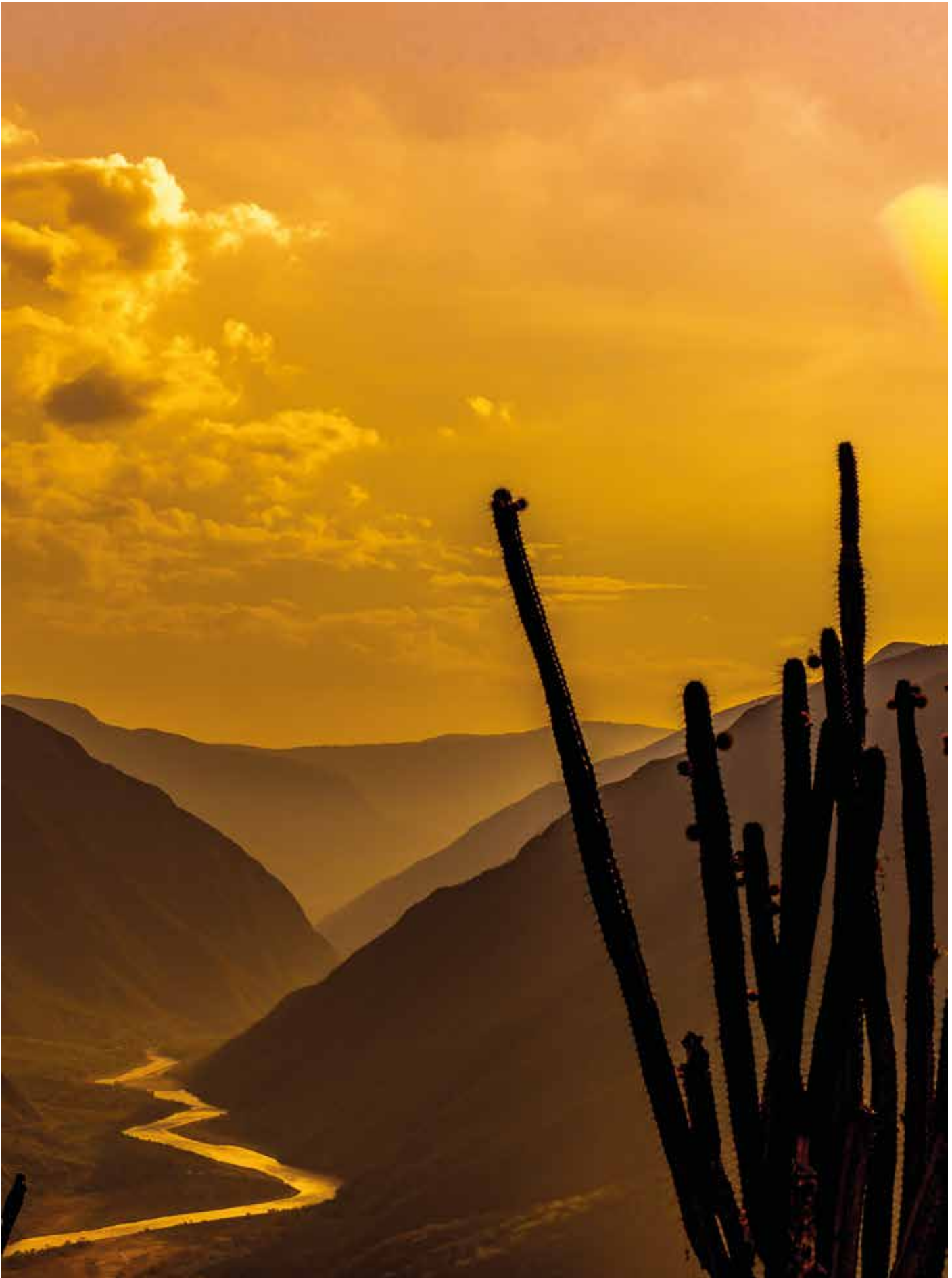
De esta manera, la muerte de una estrella, relacionada generalmente con la formación de una supernova, es decir, con una explosión

estelar que produce una luminosidad notable, es también un proceso que da origen a nuevos elementos más pesados, como el carbono, el silíceo, el hierro y el níquel, entre otros. Por consiguiente, como resultado de estos procesos, se forman nubes de gas, polvo y fragmentos de rocas que finalmente pueden ser el germen de una nebulosa protosolar y de discos protoplanetarios. Estos últimos son discos de polvo y de fragmentos de roca a partir de los cuales se forma un planeta (véase la figura 2).

Las partículas de polvo y los fragmentos de roca que se van formando dentro de los discos protoplanetarios sufren colisiones que dan origen a planetisimales, objetos sólidos de hasta un kilómetro de diámetro. Estos, a su vez, colisionan para formar protoplanetas, objetos de hasta 1000 kilómetros de diámetro, que también colisionan entre sí para formar planetas. Así se creó el planeta Tierra, que tiene 12.742 kilómetros de diámetro, es decir, unos 6371 kilómetros de radio.



La Tierra, con el cincel de los tiempos, se ha venido tallando a sí misma. Paisajes que parecen extraídos de universos paralelos se esculpen a lo largo del planeta, y sorprenden con sus formas y volúmenes hasta a los más escépticos observadores.



Atardecer en el Chicamocha desde Pescadero.

# Etapas de formación del planeta Tierra

## 1. Nebulosa solar

Despojos de una estrella gigante roja y supernova.

## 4. Formación de planetesimales dentro del disco nebular

Por la acreción constante (choque y unión de partículas) se da la formación de planetesimales no mayores a un kilómetro.

## 5. Formación de protoplanetas

Fomación de la proto-Tierra por la acreción de varios planetesimales.

## 6. Diferenciación del núcleo

El aumento de la temperatura favoreció la diferenciación por densidades dentro del planeta.

Los protoplanetas pueden tener hasta 1000 kilómetros de diámetro.

**Figura 2.** Esquema ilustrativo de las etapas de formación de nuestro planeta Tierra



**2. Disco nebuloso**

Formación de un disco nebuloso, resultado de la acción de la gravedad sobre las partículas de gas y polvo de la nebulosa.

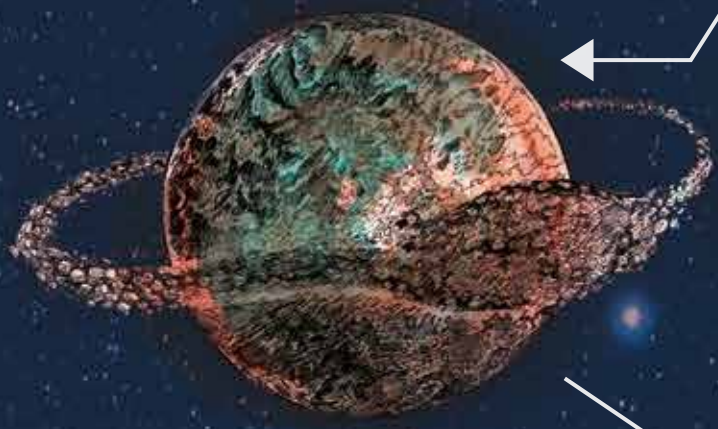
**3. Inicio de la formación de anillos**

Formación de anillos alrededor del proto-Sol, debido a la concentración de partículas de gas y polvo del disco nebuloso.

**7. Colisión de la proto-Tierra con otro protoplaneta.**



**8. Formación de un anillo de desechos alrededor de la proto-Tierra.**



**9. Formación de la luna, actual producto de la acreción de las partículas del anillo de desechos.**



La anterior noción permite entonces preguntarnos si esos materiales protoplanetarios referidos representan los residuos de la muerte de una sola estrella o si son residuos mezclados de la muerte de dos o más estrellas. La respuesta a esta pregunta exige un gran volumen de datos y un análisis muy riguroso de ellos. No obstante, un primer intento por descifrar esta cuestión supondría comparar la composición de nuestro planeta con la composición de los diferentes tipos de meteoritos primitivos o indiferenciados que han caído a la superficie terrestre y que hoy forman parte de las colecciones de las que dispone la humanidad para su estudio.

Las investigaciones han permitido derivar algunas conclusiones sobre la homogeneidad o la heterogeneidad de esos materiales primitivos. En este punto resulta importante mencionar que los meteoritos primitivos o indiferenciados, llamados meteoritos condríticos, representan fragmentos de roca que no alcanzaron a formar un planeta, por lo que su estudio resulta muy útil para conocer la composición de esos materiales de los que pudo haberse formado nuestro planeta.

Con base en un estudio comparativo, se evidenció una semejanza entre la composición de nuestro planeta y la composición de un tipo de meteorito primitivo denominado *meteorito condrito de enstatita*, considerado un objeto sólido indiferenciado (Javoy *et al.*, 2010). Se trata de un tipo de meteorito muy primitivo con presencia del mineral enstatita, conformado por  $MgSiO_3$ , con una composición isotópica que lo hace merecedor de ser el mejor candidato para representar a esos materiales primitivos que finalmente dieron origen a nuestro planeta Tierra.

Distintas geografías y un espacio en común; se trata de nuestro planeta Tierra con las obras que el tiempo ha dibujado sobre su corteza.



Páramo de Santurbán desde el corregimiento de Berlín.



Estructura del lecho de la quebrada El Salitre, municipio de Guadalupe.



El páramo o el desierto, cada uno de ellos guarda una historia que descubrimos al indagar en la esencia de la conformación de su paisaje.



Formaciones montañosas en el área de Santurbán.



Formaciones rocosas en la falda del Nevado del Ruiz.



Laguna del Medio, en el complejo lagunar Los Verdes, páramo de Santurbán.



Sin embargo, otros estudios más recientes sugieren la participación adicional de otros materiales. Entre ellos se encuentran los condritos carbonáceos, materiales primitivos con presencia de carbono y partículas volátiles; los condritos ordinarios, es decir, meteoritos con hierro oxidado y metal; y, posiblemente, otros tipos de meteoritos desconocidos que no hacen parte de las colecciones de meteoritos que el ser humano ha reunido (Carlson, 2017).

Si se asume que nuestro planeta se formó a partir de la mezcla de los materiales primitivos antes referidos, y que sus variaciones composicionales los ubican a distancias diferentes respecto de un extinto centro solar, resulta aceptable pensar que la coincidencia de esos materiales pudo darse como resultado de la muerte de un antiguo sistema estelar binario, un sistema solar en que una estrella gira en torno a otra.

Esta idea se sustenta en la consideración de que los meteoritos carbonáceos se localizan a gran distancia de la fuente, un extinto sol que dio origen a sus elementos constituyentes. La razón de esta suposición radica en que estos meteoritos contienen un alto porcentaje de componentes volátiles, y, además, se ubican en las zonas más externas del sistema solar. Por el contrario, se considera que los condritos ordinarios y de enstatita se localizan a menores distancias de esa misma fuente; en esos lugares predominan cuerpos sólidos más densos y más próximos al sol.

Todas estas particularidades referidas se presentan en nuestro sistema solar. Aunque existen otras maneras de explicar la reunión de materiales distantes y próximos, no se puede descartar la idea de que estos residuos estelares, constituyentes primordiales de la Tierra, pudieron derivar de la muerte de un antiguo sistema binario.

El número de minerales presolares documentados en la literatura científica como componentes de los meteoritos es de tan solo unos doce minerales. Esos



minerales, por ser más antiguos que la edad de formación de nuestro planeta y nuestro sistema solar en general (con más de 4600 millones de años), son evidentemente una fuente de información muy valiosa para estudiar parte de esa historia anterior a nuestro planeta y el sistema solar.

En este sentido, vale la pena recordar la gran cobertura mediática que recientemente despertó el trabajo científico de Heck y sus colaboradores, quienes reportaron la presencia de granos minerales en un meteorito que cayó en Murchinson (Australia) en el año 1969 (Heck *et al.*, 2020). Se calculó que estos granos tenían una edad de 7000 millones de años. Esta edad evidentemente es más antigua que la edad de



Lecho seco del Chicamocha.



Últimas luces sobre las montañas de Santurbán.

nuestro planeta y que la misma edad de nuestro sistema solar, y, por consiguiente, son granos minerales presolares o polvo estelar formado durante la muerte de una estrella que debió existir y morir antes de que naciera nuestro propio sol.

El número de granos minerales presolares con edades superiores a 4600 millones de años es evidentemente muy bajo, en comparación con las más de 5000 especies minerales existentes y documentadas en la actualidad. Esto nos da una idea de los cambios drásticos y de la evolución que han tenido estos materiales primordiales que dieron origen a nuestro planeta. De hecho, la evolución de esos materiales primordiales también determinó, en gran parte, la actual estructura interna de la Tierra. Asimismo, debemos partir de la concepción de que los condritos, en general, son materiales muy primitivos que no han sufrido procesos de diferenciación, es decir, que no han experimentado procesos que redistribuyan sus elementos constitutivos en función de sus afinidades geoquímicas. Esta dinámica ocurre

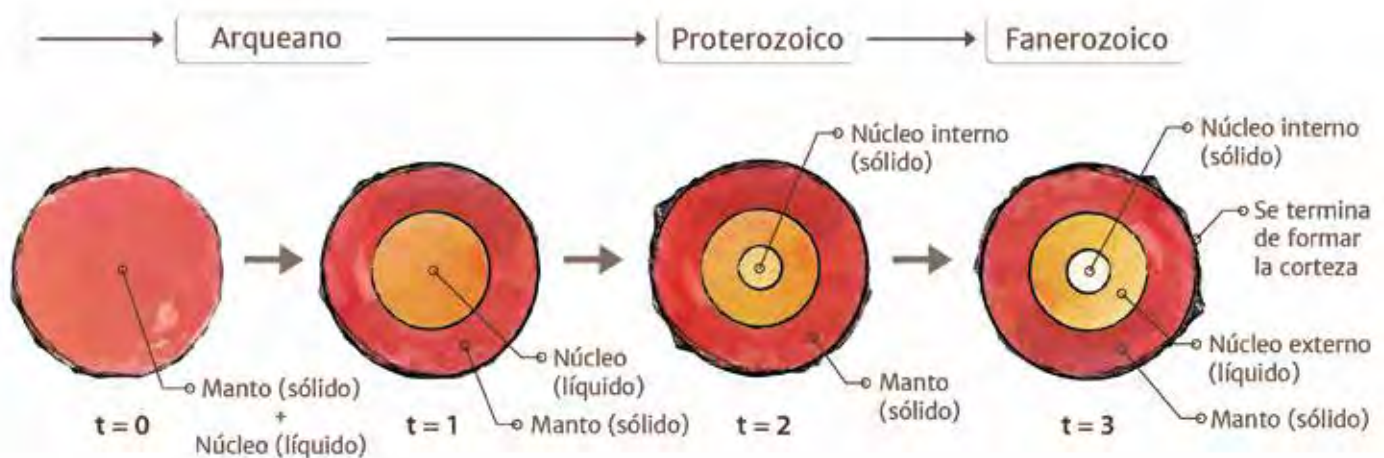
cuando unos elementos se separan para formar un fundido rico en metales, mientras que otros elementos lo hacen para formar una fase gaseosa; la misma dinámica se mantiene en otros grupos de elementos.

La diferenciación de estos materiales primordiales inició cuando empezaron a colisionar entre ellos y a aglomerarse para formar una masa fundida, que posteriormente dio origen a la Tierra. Este proceso, que dio lugar al primer evento de diferenciación de escala planetaria que favoreció la formación de un núcleo líquido y un manto terrestre sólido, se considera que ocurrió hace 4525 millones de años (Labrosse *et al.*, 2001).

Hace 2500 millones de años tuvo lugar otro importante evento de diferenciación de escala planetaria, que permitió la separación de elementos del núcleo líquido existente hasta ese momento, para formar un núcleo interno sólido y un núcleo externo líquido que aún

persiste, y cuyo movimiento genera el campo magnético que envuelve el planeta. Mientras esto sucedía en el núcleo terrestre, el manto terrestre sufría eventos de convección, una forma de transferencia de calor entre zonas con diferentes temperaturas. Estos eventos facilitaron la formación de fundidos silicatados durante el ascenso de materiales del manto más caliente, lo que contribuyó a la formación de la corteza terrestre (véase la figura 3).

Así mismo, los procesos de diferenciación antes referidos dan cuenta de que nuestro planeta se enfría progresivamente. Al respecto, cabe preguntarnos qué le pasará al planeta si continúa su proceso de enfriamiento. Pues bien, fácilmente podemos suponer que en algún momento el núcleo externo líquido podría solidificarse, y que este fenómeno tendría consecuencias devastadoras para nuestro hogar planetario, pues generaría, entre otras cosas, la inactividad de los procesos de convección del manto y el cese de la tectónica de placas.



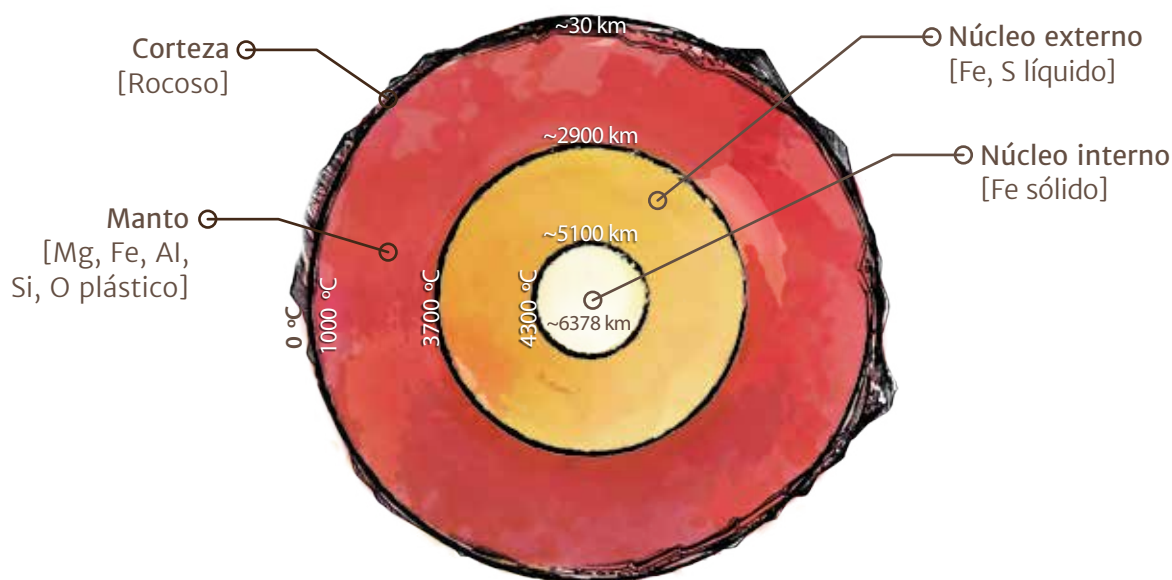
**Figura 3.** Importantes eventos de diferenciación experimentados por la Tierra. Tomado y modificado de Labrosse *et al.* (2001)

## Estructura interna del planeta Tierra

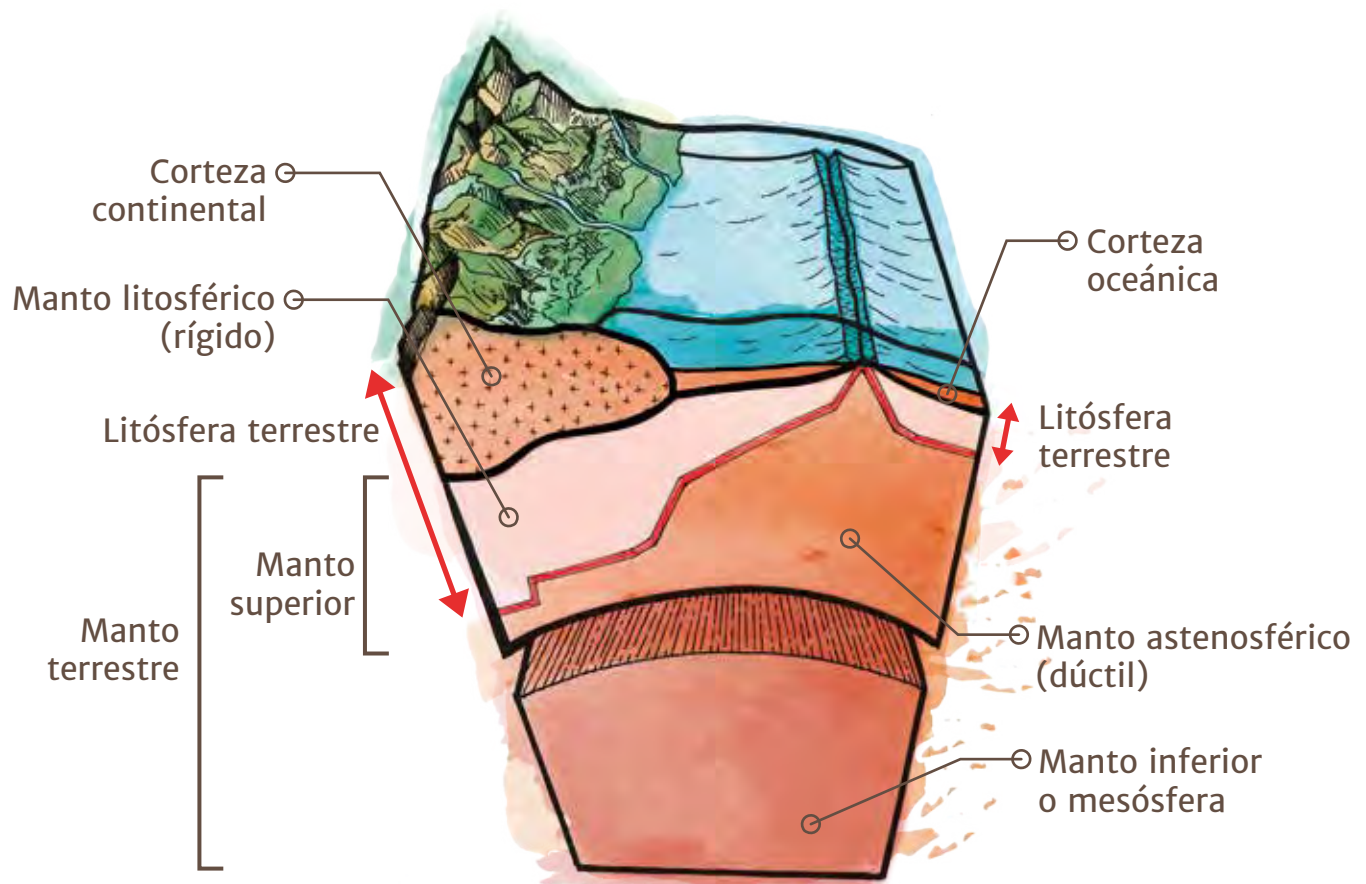
El resultado de la prolongada historia termal de nuestro planeta y de la evolución de los materiales primitivos que lo formaron ha dado lugar a un cuerpo planetario diferenciado, opuesto a los materiales indiferenciados, como los condritos. Este cuerpo planetario se compone de un núcleo interno sólido localizado a 5100 kilómetros de profundidad, que abarca hasta 6378 kilómetros, lo que equivale a una columna sólida de 1278 metros de espesor; un núcleo externo líquido localizado a 2900 kilómetros de profundidad, que se extiende hasta 5100 kilómetros, y equivale a una columna de un fundido metálico de unos 2200 metros de espesor; un manto terrestre localizado a una profundidad de 30-70 kilómetros de profundidad, que en determinados ambientes puede, incluso, estar muy cerca del piso oceánico, y alcanza unos 2900 kilómetros de profundidad, medida que puede asimilarse a una columna de roca de unos 2830-2870 kilómetros de espesor, y una corteza terrestre que en ambientes oceánicos suele ser más delgada, entre 5 y 7 kilómetros de espesor,

salvo en algunos sectores donde puede alcanzar espesores de hasta 35 kilómetros, mientras que en ambientes continentales es más gruesa, y presenta hasta 70-80 kilómetros de espesor (véase la figura 4).

Es posible dividir el manto terrestre en varias capas, según diferentes criterios. Se lo ha dividido en manto inferior y manto superior, según criterios geofísicos; pero también en manto primitivo y manto empobrecido, según criterios geoquímicos. Al manto inferior también suele llamárselo mesósfera, mientras que al manto superior se lo ha dividido en manto astenosférico, de comportamiento más dúctil, y en manto litosférico, de comportamiento más frágil. El conjunto conformado por el manto litosférico y la corteza terrestre se denomina litósfera terrestre, muy delgada en algunos sectores del piso oceánico, pues solo tiene unos pocos kilómetros, y muy gruesa en sectores continentales con presencia de rocas muy antiguas, en donde puede llegar a alcanzar alrededor de 300 kilómetros de espesor (véase la figura 5).



**Figura 4.** Estructura interna del planeta Tierra



**Figura 5.** Esquema de la estructura o arquitectura de la litósfera terrestre



Cae la tarde sobre la serranía de los Yariguíes en cercanías de Contratación.



Primeras formaciones del naciente Cañón del Chicamocha, en jurisdicción del municipio de Onzaga.

## Procesos endógenos y exógenos

Nuestro planeta es un cuerpo dinámico en el que ocurren procesos internos y externos que moldean y transforman permanentemente la superficie terrestre. Los procesos internos, también conocidos como procesos endógenos, son el resultado de la actividad interna del planeta y, por consiguiente, tienen la capacidad o la fuerza para formar sistemas montañosos, deformar las rocas, generar terremotos, depresiones, volcanes, géiseres y campos geotermales, entre otros. En términos generales, los procesos endógenos son los responsables de la tectónica de placas litosféricas y de sus fenómenos asociados (véase la figura 6).

Los procesos exógenos son aquellos que tienen lugar en la superficie terrestre, y que se mantienen activos gracias a la energía externa que recibe nuestro planeta, por ejemplo, la energía solar. Los agentes responsables de los procesos exógenos son el agua, el viento y los seres vivos,

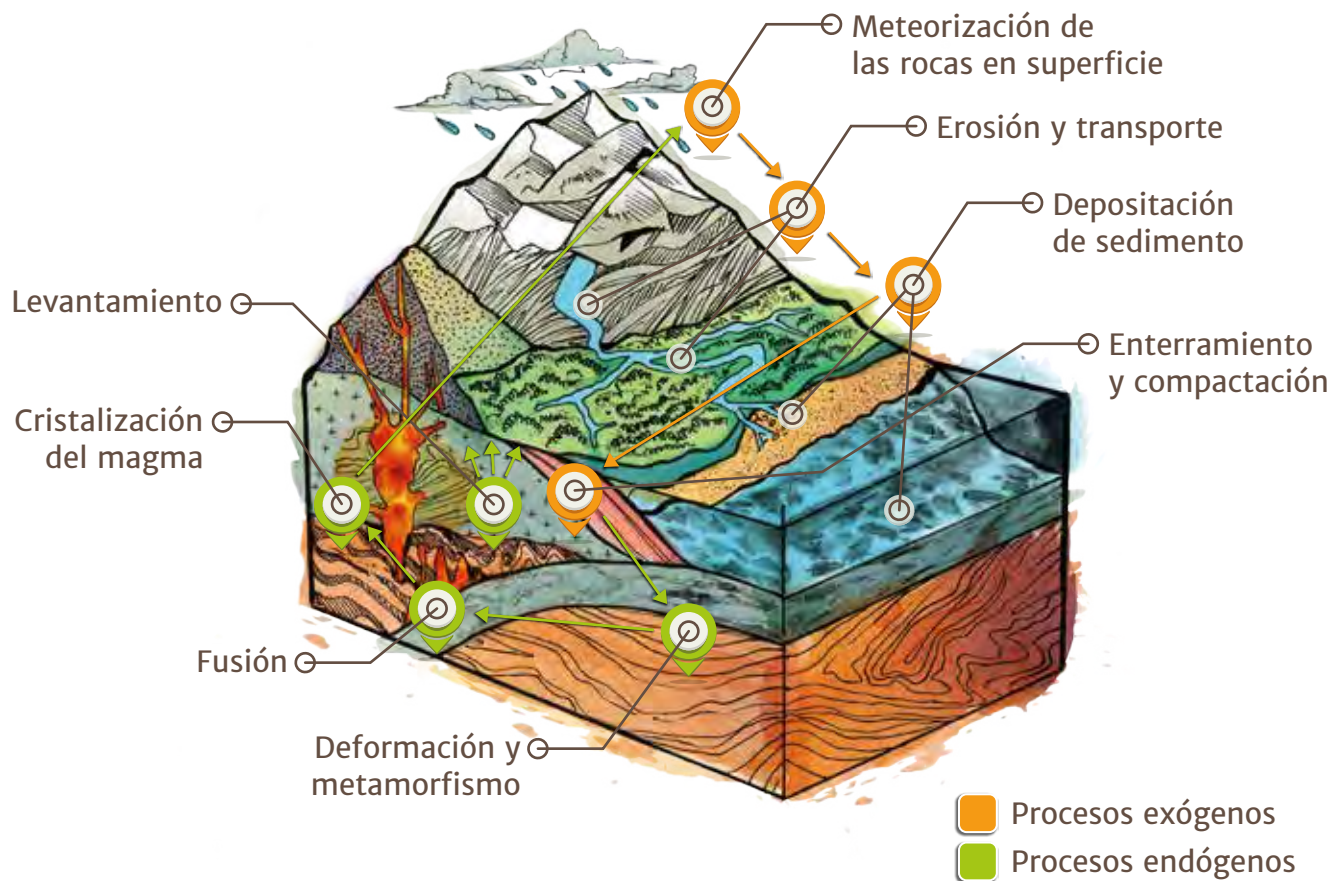
entre otros. Mientras los procesos endógenos tienen la fuerza para construir el relieve, como las montañas o los volcanes, los procesos exógenos tienen la fuerza para destruirlo, por ejemplo: el agua de lluvia y el viento meteorizan las rocas, las erosionan, las transportan y sedimentan sus detritos en áreas deprimidas de la superficie terrestre (véase la figura 6).

En este sentido, los procesos exógenos tienden a eliminar el desnivel del relieve. Así que, si no existieran los procesos endógenos, la superficie terrestre muy probablemente no tendría montañas, y sería prácticamente una gran planicie; es decir, todo el desnivel de la superficie terrestre se habría eliminado.

A continuación, analizaremos brevemente los agentes responsables de los procesos endógenos y exógenos, y también comentaremos algunas implicaciones globales de estos procesos en nuestro planeta Tierra.



La actividad interna de la Tierra, junto a diversas acciones sobre su superficie, van moldeando el paisaje a lo largo del tiempo.



**Figura 6.** Ilustración de la dinámica terrestre, derivada de la interacción entre los procesos endógenos y exógenos

## Procesos endógenos

Los procesos endógenos se asocian con el calor interno del planeta, de diferentes orígenes. Entre otros fenómenos que causan el calor interno terrestre, vale la pena subrayar el denominado *calor remanente*, derivado de la etapa temprana de las colisiones de los materiales que formaron nuestro planeta. También se encuentra el *calor latente de cristalización*, que se desprende cuando se cristalizan fases ricas en hierro, especialmente en la interfase entre el núcleo externo líquido y el núcleo interno sólido de nuestro planeta, proceso que suele tener lugar a unos 5100 kilómetros de profundidad.

En este punto vale la pena recordar que nuestro planeta es un cuerpo que progresivamente se enfría, y, por ende, podemos inferir que su núcleo interno sólido ha crecido progresivamente a lo largo de la historia del Planeta. De esta manera, es válido entonces

también suponer que algún día su núcleo externo líquido se cristalizará completamente, lo que se conoce como transición de líquido a sólido; y no resulta exagerado imaginar que este cambio interno tendría efectos globales nada alentadores para los seres vivos que lo habitamos. Aunque no sabemos cuántos millones de años debemos esperar para que esto ocurra, lo que sí anhelamos es que para ese momento nuestra especie aún exista, y que preferiblemente se encuentre ya resguardada en otro planeta habitable de nuestro vasto espacio sideral.

Con las ideas sobre los procesos endógenos y sus fuerzas motoras antes descritas, podemos entonces considerar algunos aspectos generales que definen la dinámica global interna de la Tierra, empezando por señalar los efectos derivados de su heterogeneidad termal. En este sentido, es necesario señalar la diferencia de temperaturas entre el límite núcleo-manto y



Las diferentes manifestaciones de una dinámica interna, visible en la superficie en un conjunto de expresiones físicas que nos hablan de ese planeta vivo.

Rocas emergentes en la llamada “Ciudad de Piedra”, valle de La Lindosa, Guaviare.



Formaciones rocosas en el páramo de Listará, Cerrito.

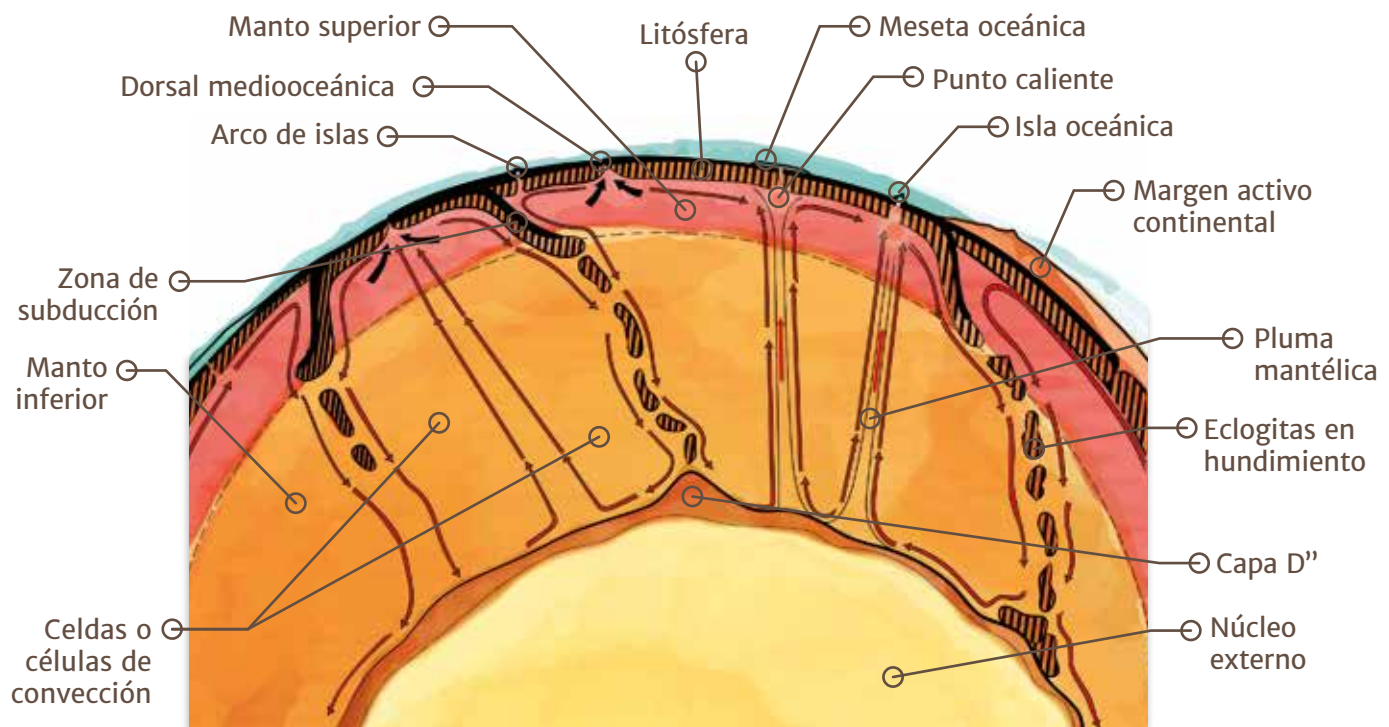




Interior de la cueva de Los Pichones, municipio de Encino.

la base de la litósfera terrestre; el primero presenta una temperatura de alrededor de 3700 °C a unos 2900 kilómetros de profundidad, y el segundo registra unos 1000 °C a unos 120 kilómetros de profundidad. El manto es más caliente en la parte más baja o profunda y más frío en la parte más alta o superficial, en donde además pierde calor a través de la litósfera. Estas diferencias de temperatura, sumadas al consecuente carácter dúctil de sus rocas constituyentes, que en este caso se lo puede equiparar en su reología con el comportamiento de una plastilina, favorecen la formación de corrientes o celdas o células de convección dentro del manto terrestre (véase la figura 7).

Las celdas de convección del manto contribuyen al transporte ascendente del material rocoso más caliente y también menos denso hasta que este entra en contacto con la litósfera, más fría y frágil; en ese momento se produce una pérdida de calor del material ascendente y, en consecuencia, un aumento de su densidad. Esto produce, a su vez, su posterior descenso o retorno hacia la base del manto. Nuevamente allí, en la base del manto, el material se vuelve a calentar para posteriormente reiniciar su ascenso y así configurar las denominadas corrientes, celdas o células de convección del manto (véase la figura 7). Estas corrientes de convección en el manto terrestre se consideran la causa principal del desplazamiento, resquebrajamiento y choque entre las diferentes placas litosféricas. En este marco de interacciones referido se generan, en su mayoría, procesos endógenos, como sismos, deformación de las rocas, volcanes, etcétera.



**Figura 7.** Corrientes de convección del manto terrestre y su relación con los movimientos de las placas litosféricas



Lecho del río Oibita en el santuario de fauna y flora Alto Río Fonce.



## Procesos exógenos

Revisemos a continuación los procesos exógenos, entre los que se destacan la meteorización, la erosión, el transporte y la sedimentación.

### La meteorización

La meteorización es el resultado de la disgregación o descomposición de los minerales que constituyen las rocas, cuando estas entran en contacto con la atmósfera, la hidrósfera o la biósfera. Esta interacción produce cambios en los minerales y, por consiguiente, modifica la roca que se compone de ellos. Los cambios principales durante la meteorización son el cambio de volumen de la roca, la formación de nuevos minerales —generalmente más estables en ambientes superficiales— y la pérdida de consistencia de la roca. La meteorización puede ser, hasta donde se conoce, de tres tipos: física, química y biológica.

### *La meteorización física*

Produce disgregación de la roca sin cambio de su composición química. El impacto de la radiación solar durante el día y del frío durante la noche produce sutiles dilataciones y contracciones en las rocas, a tal punto que generan rupturas en ellas. Lo mismo sucede cuando la roca aflora en zonas afectadas por ciclos de humedad y sequía, y también en zonas de latitudes altas. En



Laguna La Negrita en Santurbán.



Formaciones sobre el lecho de la quebrada Las Gachas, Guadalupe.

estas últimas, el agua líquida contenida en las fracturas o en los poros de las rocas puede congelarse cuando bajan las temperaturas; este proceso genera un ligero cambio de volumen, un paso de líquido a sólido, que, a su vez, se traduce en la ampliación o creación de nuevas fracturas, que contribuyen a la disgregación progresiva de las rocas expuestas en la superficie.

### ***La meteorización química***

Causa cambios composicionales en las rocas, debido a la oxidación de algunos de sus minerales, como consecuencia de su exposición al oxígeno atmosférico. El contacto de los minerales primarios (aquellos formados a más altas temperaturas y presiones que las existentes en las condiciones superficiales) con la atmósfera y la hidrósfera puede igualmente producir la disolución de minerales solubles, como, por ejemplo, la disolución de cristales de sal presentes en algunas rocas; pero también puede producir la hidratación o la hidrólisis de algunas especies minerales.

### ***La meteorización biológica***

Ocurre por el crecimiento de raíces de árboles en fracturas o en oquedades primarias de las rocas, como también por la acción de los ácidos orgánicos asociados a ellas. Por tanto, puede provocar la fragmentación y la descomposición de las rocas.

### **La erosión**

La erosión es el proceso por el que una roca sufre desgaste o deterioro por acción de agentes externos, como el agua, el viento o el hielo, entre otros. Este desgaste se traduce en la formación de partículas o sedimentos que, posteriormente, son transportados a otros lugares por esos mismos potenciales agentes externos mencionados. La erosión contribuye significativamente a la formación de valles, cavernas, mesas y cañones, entre otras formas del paisaje.

### **El transporte**

El transporte consiste en el traslado de los materiales de disgregación o de los sedimentos formados durante los procesos de meteorización y erosión. Es un proceso exógeno a cargo de agentes externos, como el agua, el viento, los glaciares, los flujos de lodo, etcétera. Los materiales más pesados y grandes, formados durante la meteorización y la erosión, difícilmente son movilizados por los agentes exógenos antes mencionados. Sin embargo, los componentes más finos y aquellos derivados de la disolución de los minerales pueden ser transportados a grandes distancias. Por ejemplo, los materiales formados por meteorización y erosión de rocas expuestas en el cañón del río Chicamocha pueden ser transportados por las aguas del río, que pueden incluso arrastrar partículas o solutos hasta el río Sogamoso, y este, a su vez, puede llevarlas hasta el río Magdalena, y desde allí ser conducidas hasta el mar Caribe.

Aunque en este extenso recorrido fluvial muchos sedimentos se decantan y se precipitan en zonas de baja energía, los solutos y los fragmentos más finos, como, por ejemplo, partículas del tamaño de arcillas, inferiores a 2 micras, podrían alcanzar su destino final: su sedimentación en las depresiones más importantes del planeta, como los mares y los océanos.

### **La sedimentación**

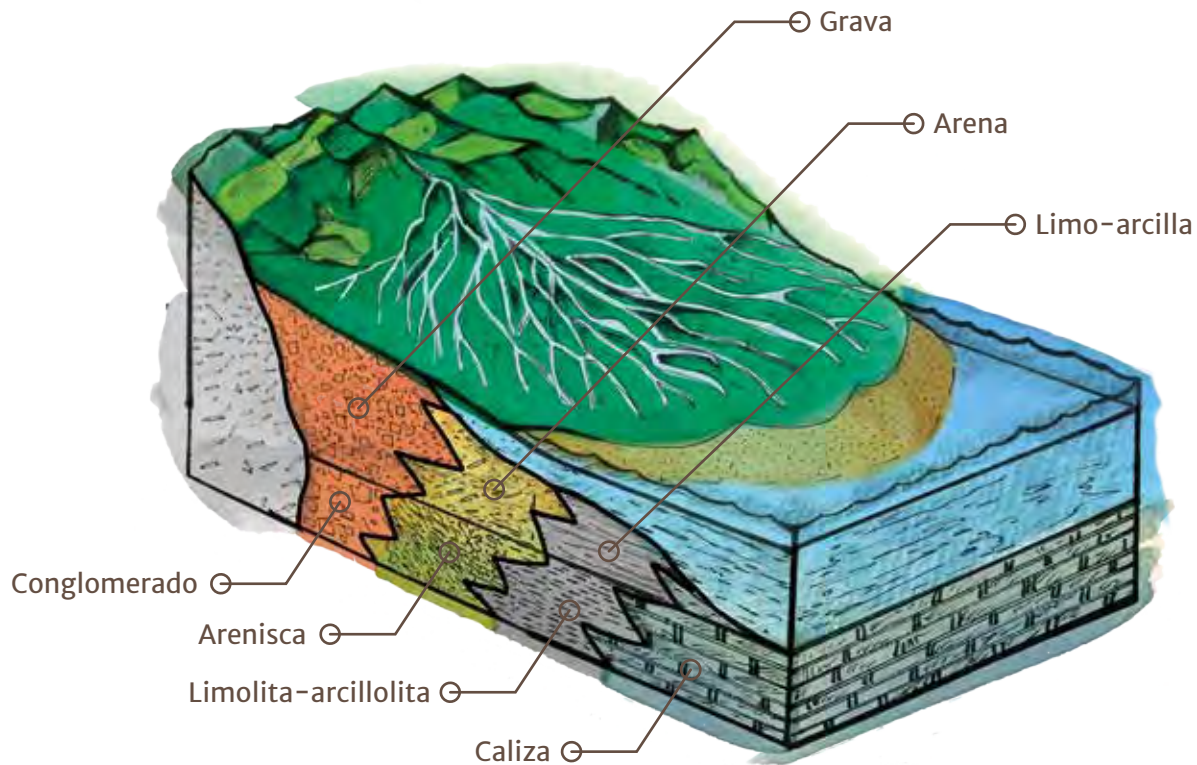
Este es otro de los procesos exógenos que caracterizan la dinámica planetaria. La sedimentación de los materiales transportados, por ejemplo, por las aguas, el viento o los glaciares, suele producirse en aquellos tramos donde el agente que transporta los sedimentos pierde energía. Como se mencionó anteriormente, estos procesos de transporte y sedimentación distribuyen gradualmente las partículas y los sedimentos, y dan origen a una distribución granulométrica en el componente lateral; es decir, los fragmentos más pesados y grandes suelen tener menos transporte, y generalmente se sedimentan o se depositan cerca de las zonas que son fuente de sedimentos. Por el contrario, los fragmentos cada vez más finos suelen sedimentarse en áreas distantes en relación con el área fuente de sedimentos (véase la figura 8).



Lecho seco del río Nevado en cercanías de Capitanejo.

La sedimentación en grandes áreas tras el arrastre de las aguas va conformando la estructura de un paisaje donde arena y arcilla se vuelven el común denominador de los procesos geológicos.





**Figura 8.** Esquema ilustrativo de una distribución granulométrica ideal de sedimentos formados por acción de agentes exógenos (transformados en rocas sedimentarias)

La sedimentación suele dejar una impronta del ambiente donde los materiales se depositaron. Por ejemplo, si la sedimentación tuvo lugar en un lago, en un tramo de un sistema fluvial con baja energía, en una zona de playa o en un abanico aluvial, como la desembocadura del río Magdalena, esos sedimentos suelen heredar características propias de ese ambiente de sedimentación. Así, por ejemplo, pueden contener conchas de mar, lo cual es un indicador de un ambiente marino; pueden desarrollar cuerpos sedimentarios en forma de abanico, lo cual remite a una desembocadura de un río; pueden contener icnitas o huellas de dinosaurio, lo que sugiere la existencia de ambientes pantanosos o húmedos; entre otros muchos rasgos, atributos o improntas. Los sedimentos suelen depositarse en zonas deprimidas de la litósfera, denominadas cuencas sedimentarias. Estos sedimentos suelen sufrir enterramiento

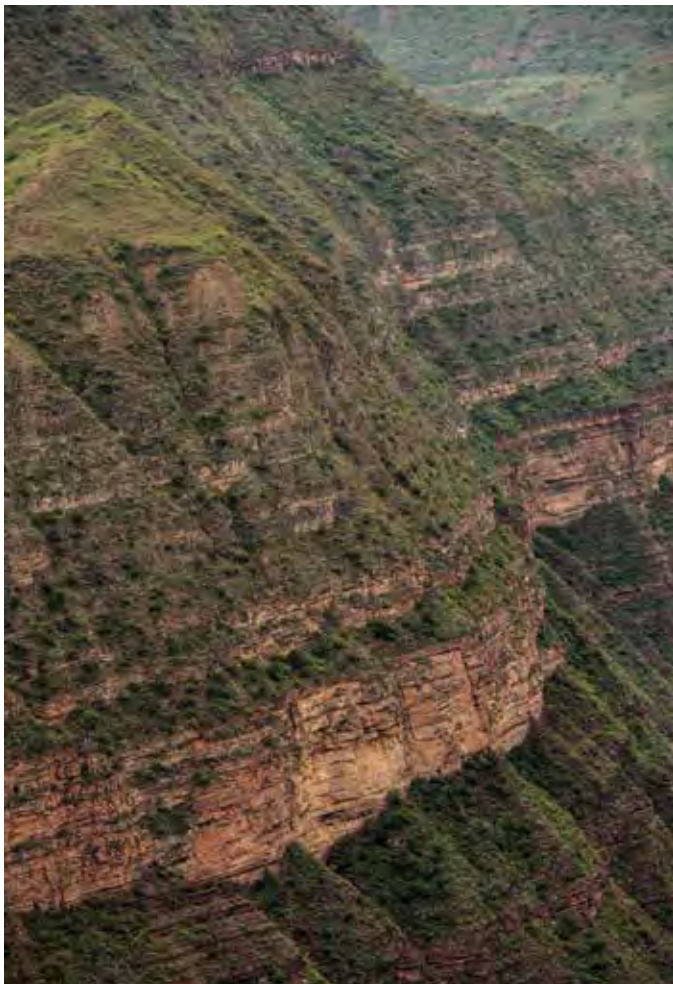
progresivo, y ello aumenta la temperatura y la presión en todos los componentes del cuerpo sedimentario; de esta manera, se produce la compactación y la cementación de los sedimentos, y se da origen a su litificación, es decir, a la formación de rocas.

Considerando la distribución de los tamaños de los materiales sedimentados y las características del ambiente en que se depositaron los sedimentos, los geólogos podemos reconocer esas características en las rocas y podemos determinar la variación lateral de los ambientes. Así, por ejemplo, es posible identificar si en un sector había un mar o un río, y, en consecuencia, reconstruir la paleogeografía, o la geografía antigua, que dominó en una región, un continente o en el planeta en general durante un tiempo determinado de su pasado geológico.

## Consideraciones finales sobre la dinámica terrestre

Para finalizar este capítulo, tal como fue prometido en sus líneas iniciales, a continuación, se hará referencia a las implicaciones globales derivadas de esta dinámica planetaria, en que interactúan los procesos endógenos y exógenos, y se comentará brevemente el papel del hombre como nuevo agente geológico, con la capacidad de generar cambios globales en periodos muy cortos.

Los procesos endógenos, aquellos que determinan el movimiento de las placas tectónicas y sus interacciones, y que forman cadenas de montañas o depresiones, entre otras, ejercen una influencia en el clima global y en los procesos de transferencia de calor. La razón de esta influencia se debe a que estos procesos endógenos son los responsables de la



Paisaje de las minas de yeso en Los Santos.



Mineral de yeso en cercanías de Los Santos.

formación y de las dimensiones que alcanzan las depresiones litosféricas, como las cuencas oceánicas, los mares y los extensos lagos, pero también de las elevaciones del terreno, como las cadenas de montañas. Esto, a su vez, influye en los patrones de transferencia de calor que tiene lugar mediante la circulación de las aguas en los océanos, el transporte de la humedad en la atmósfera, etcétera.

Un ejemplo de esta influencia global es el cierre del canal marítimo de Panamá, que empezó hace unos 12 millones de años y culminó hace unos 4 millones de años. Este cierre generó el desarrollo de las corrientes del golfo del Atlántico Norte, que transportan aguas cálidas hacia las altas latitudes del planeta, en donde se enfrían y forman importantes capas de hielo polar. La explosión de volcanes y sus emisiones de gases y cenizas a la atmósfera son otra expresión de los procesos endógenos que influyen en el clima global, con efectos que pueden tener corta o larga duración.

Los procesos exógenos también tienen repercusiones globales, debido a su capacidad para liberar componentes químicos, tal como sucede, por ejemplo, durante la meteorización química de las rocas. Estos componentes

determinan la química de los océanos, los ríos, las aguas subterráneas y los suelos (Putnis y Ruiz-Agudo, 2013). De la misma manera, estos procesos exógenos facilitan la liberación de elementos y componentes, como fósforo, potasio y calcio, entre otros, a partir de las rocas meteorizadas, que forman los nutrientes necesarios para los organismos vivos y, en general, los ecosistemas del planeta. Estos procesos exógenos pueden considerarse el punto de partida del ciclo de los elementos.

Para finalizar, merece la pena hacer alusión a ese nuevo agente geológico que ha contribuido de manera acelerada a la modificación de la superficie terrestre: el hombre. Su papel ha sido tan marcado que ha contribuido a la formación de nuevos materiales, como el plastiglomerado, una roca formada por fragmentos de plástico mezclados con otros fragmentos de rocas. Este material, sin duda alguna, será uno de los más

característicos de la época geológica propuesta, denominada *antropoceno*. El origen de esta nueva época aún está en discusión; algunos geólogos establecen que comienza con el desarrollo de la agricultura, y otros señalan que parte con el inicio de la revolución industrial.

Así mismo, el surgimiento de ese nuevo agente geológico (el hombre) en la evolución del planeta ha contribuido a la generación de grandes cambios. De entre ellos, se destacan especialmente los relacionados con los procesos exógenos, considerando las implicaciones propias de las grandes obras de infraestructura, como, por ejemplo, la construcción de presas, en la distribución granulométrica natural de los detritos transportados por los ríos; la liberación de sustancias químicas, desechos industriales, residuos radioactivos y gases derivados de procesos industriales; y el cambio de la química de los suelos, las aguas y la atmósfera.

## Tectónica de placas y ciclo de Wilson

Una gran parte de la población mundial puede hacer clic en la pantalla de un computador, activar un programa informático como Google Earth y ver nuestro mundo en diferentes escalas; es decir, actualmente podemos tener una imagen global del planeta, ver continentes y océanos, y también hacer acercamientos hasta ver objetivos puntuales de nuestro interés, como ríos, lagos y picos de montañas. Gracias a estos programas o herramientas, hemos podido explorar el mundo desde nuestras casas, algo que, sin duda alguna, ha contribuido a que la *geografía* sea más divertida y fácil de entender.

Sin embargo, explorar de la misma manera nuestro planeta tal como era en tiempos geológicos pasados implica reconstruir su *paleogeografía*, lo que puede hacerse estudiando algunos materiales geológicos, como rocas, fósiles y minerales, del periodo de interés. Estos estudios ayudan a reconocer los lugares donde existían lagos, ríos y montañas, y, en general, permiten visualizar cómo eran los continentes en esas épocas pasadas, mediante el uso del paleomagnetismo u otros métodos. Gracias a la paleogeografía, se han trazado paleomapas globales de la Tierra para diferentes tiempos geológicos, y muestran claramente que nuestro planeta era muy diferente de como lo conocemos hoy (véase la figura 9).

Imagen actual



Cretácico



Devónico



**Figura 9.** Diferencias entre la imagen actual de nuestro planeta y aquellas reconstruidas para el Cretácico, hace 120 millones de años, y el Devónico, hace 410 millones de años



Cañón del río Sogamoso en Zapatoca.

Entre las muchas diferencias observadas se destaca la existencia en el pasado de grandes áreas continentales que representaban la unión de varios continentes, a las que se llamó *supercontinentes*. Estas enormes masas continentales se resquebrajaron con el paso del tiempo para formar así masas continentales menores. En la actualidad se tienen documentados aproximadamente siete supercontinentes. Algunos de ellos son más aceptados por la comunidad geocientífica, debido al volumen y la robustez de los datos, mientras que otros aún siguen siendo tema de debate.

En cualquier caso, entre esos supercontinentes se destacan los siguientes: Válvara, formado hace unos 3600 millones de años; Ur, formado hace 3000 millones de años (estos dos primeros supercontinentes no superaban en tamaño al actual continente australiano); Kenorland, formado hace unos 2500 millones de años, más extenso que sus predecesores; Columbia, formado hace unos 1800 millones de años; Rodinia, formado hace unos 1100 millones de años; Pannotia, formado hace unos 600 millones de años; y Pangea, formado hace unos 300 millones de años. Aunque aún faltaría mucho tiempo para volver a configurar otro supercontinente, se especula que en unos 250 millones de años tendremos un nuevo agrupamiento de masas continentales para formar un nuevo supercontinente, posiblemente mayor en tamaño a todos los anteriores), al que ya se le tienen varios posibles nombres, según las proyecciones de su futura configuración: Novopangea, Amasia, Áurica o Pangea Última.

Con seguridad, en este punto, el lector se preguntará qué procesos favorecieron tanto el crecimiento progresivo de las masas continentales como su posterior disgregación. Esta pregunta es fundamental para orientar la búsqueda de respuestas que nos permitan entender los procesos y los mecanismos que han

determinado estos cambios terrestres que aún continúan activos. En este sentido, varias han sido las respuestas, y, aunque hoy algunas de ellas no son aceptadas, sin duda alguna, todas fueron el resultado de profundas cavilaciones científicas que en su conjunto dieron origen posteriormente a uno de los más grandes avances geocientíficos del siglo XX: la teoría de la tectónica de placas.

Las placas litosféricas se conciben como placas rígidas cuyos límites son de tres tipos: divergentes, convergentes y de fricción. Los límites divergentes están marcados por las zonas de expansión del fondo marino, donde se crea nueva corteza oceánica que coincide con las dorsales oceánicas. Los límites convergentes están marcados por las zonas donde tiene lugar la subducción litosférica, donde hay desaparición de corteza oceánica, y por las zonas de colisión. Los límites de fricción están marcados por fallas, especialmente las denominadas fallas transformantes. Actualmente se reconocen 15 placas tectónicas principales (véase la figura 10) y unas 43 placas secundarias o menores.



**Figura 10.** Distribución de las actuales placas tectónicas mayores y sus diferentes límites



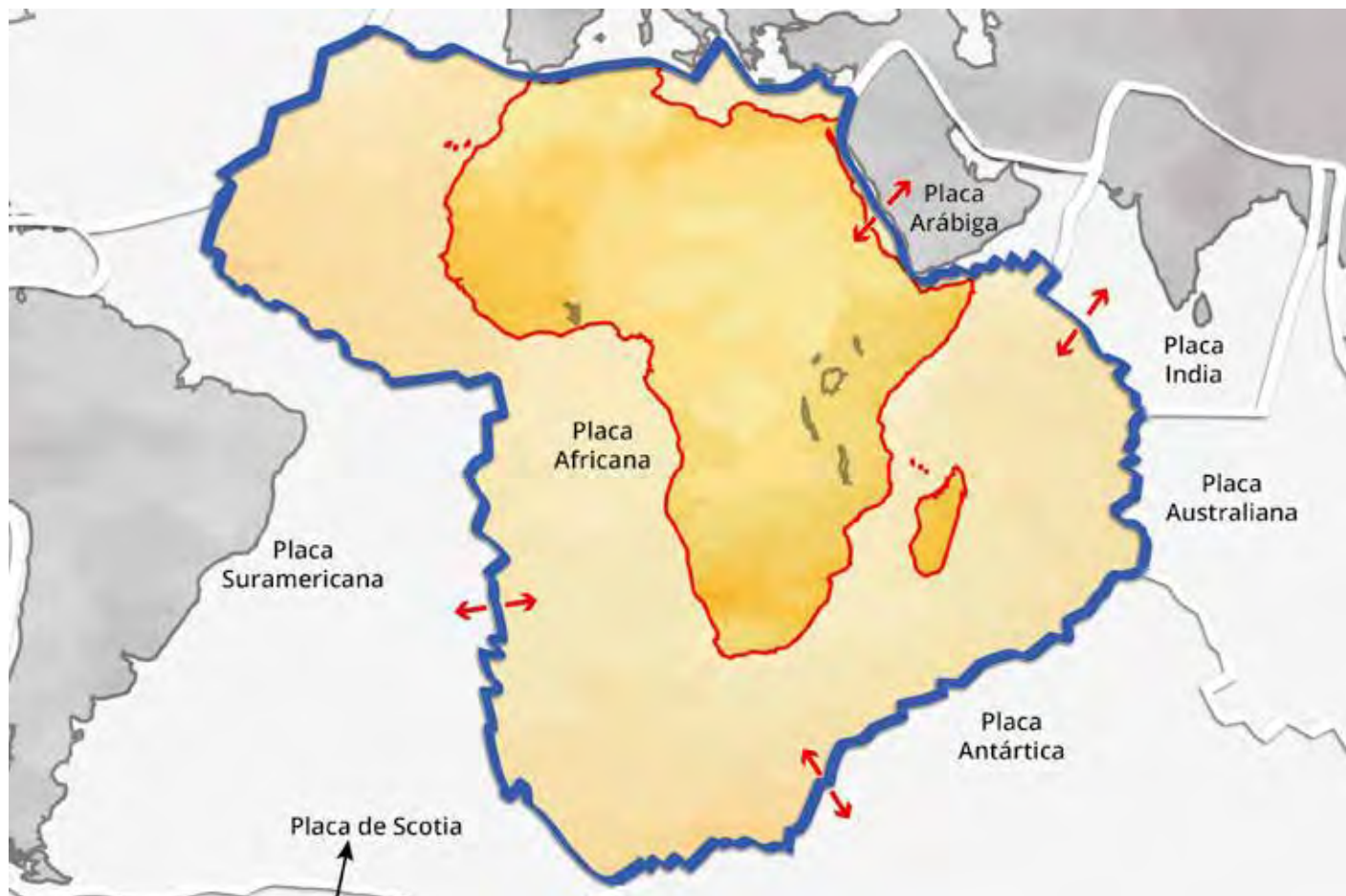
Río Sogamoso a su paso por Betulia.

## Evolución de una teoría

Antes de continuar, vale la pena aclarar dos conceptos diferentes que suelen ser usados como equivalentes de manera desacertada. El primero tiene que ver con el concepto de *deriva continental*, propuesto a principios del siglo XX por el alemán Alfred Wegener, cuando se pensaba que debajo de la corteza terrestre el material se comportaba de manera dúctil o plástica. Este concepto, actualmente en desuso, dio paso al concepto de *tectónica de placas litosféricas*.

Recordemos que la litósfera es la suma de la corteza terrestre más la parte superior del manto, que presentan una reología de afinidad frágil, no dúctil. El manto que subyace a la litósfera o a las

placas litosféricas es el manto astenosférico, con una reología propia de materiales dúctiles. Por esta razón, el manto dúctil no subyace directamente a la corteza, como se pensaba a inicios del siglo XX, y, por consiguiente, no son los continentes los que se desplazan, sino que lo hacen las placas litosféricas. Más aún, los límites de los continentes son muy diferentes de los límites de las placas litosféricas. Si vemos los límites del continente africano y los límites de la placa africana (véase la figura 11), podemos fácilmente notar la enorme diferencia entre lo que implicaba el concepto de deriva continental y lo que hoy implica el concepto de tectónica de placas litosféricas.



**Figura 11.** Diferencia entre el antiguo concepto de deriva continental (concebido como el desplazamiento del continente, límites señalados en línea roja) y el actual concepto de tectónica de placas litosféricas (concebido como el desplazamiento de la Placa Tectónica, límites señalados en línea azul).



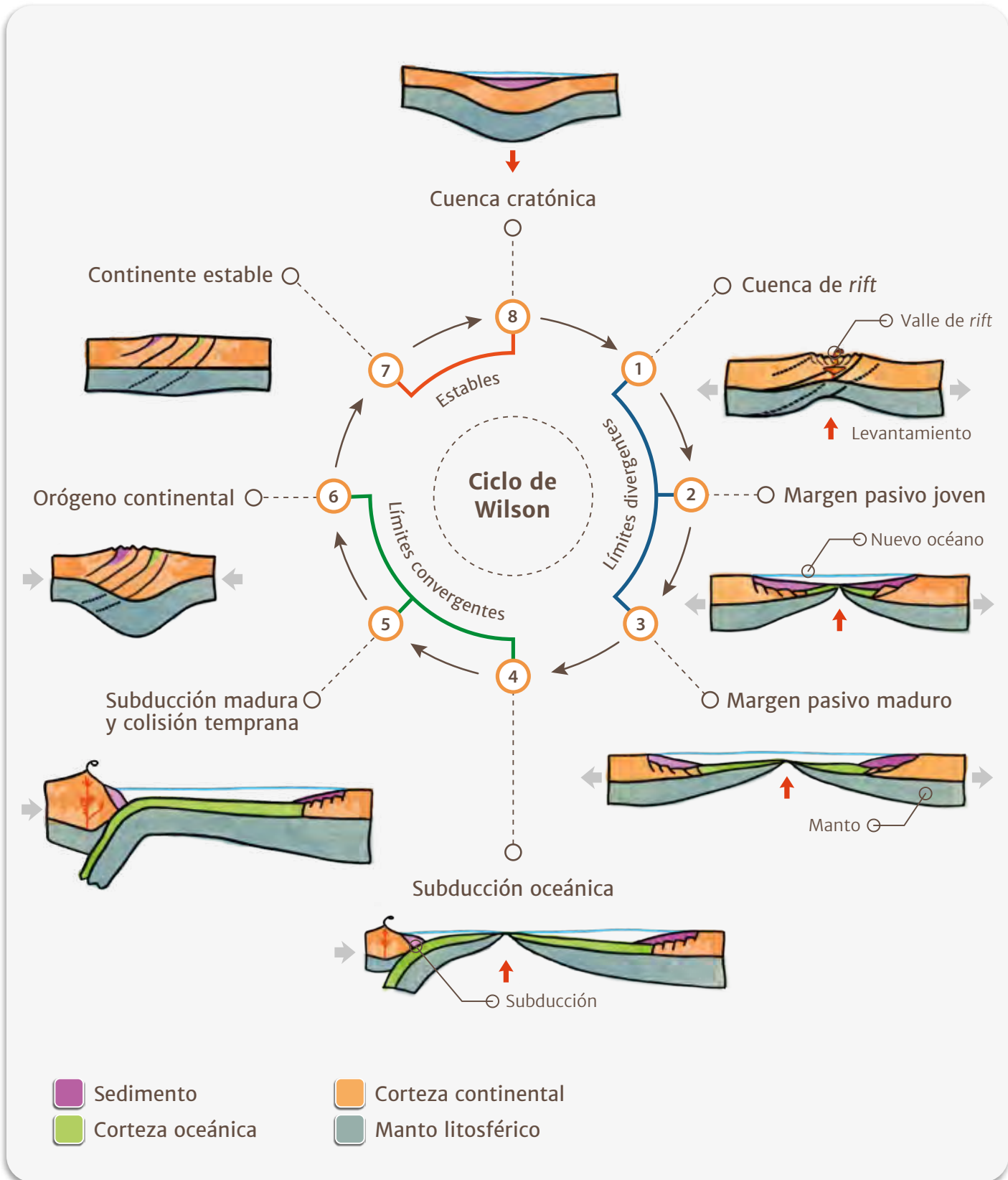
La tectónica de placas evolucionó sobre la base de varias observaciones e ideas previas, entre las que podríamos mencionar las siguientes: (1) la distribución de fósiles y capas de rocas similares en terrenos hoy separados apoyaba la idea de una conexión pasada entre terrenos. Los geólogos de los Alpes habían demostrado el gran desplazamiento que debieron sufrir algunas unidades de rocas durante la formación de ese sistema montañoso. (2) La idea de una deriva continental como explicación para reconocer que Europa y África debieron haber estado antes unidos con Norte América y Suramérica (formando el supercontinente Pangea). (3) La teoría de la expansión del fondo oceánico para explicar la existencia de franjas de rocas con polaridades alternantes del campo magnético observadas en el fondo oceánico y como mecanismo para explicar la separación de los continentes. (4) La convección del manto terrestre dúctil como mecanismo para explicar la expansión del fondo oceánico, mediante el crecimiento de corteza oceánica, y la separación de los continentes. (5) La subducción de la litósfera, que suele coincidir con las fosas profundas oceánicas y el concepto del ciclo de Wilson, que surge como explicación para reconocer los ciclos de repetida apertura y cierre de las cuencas oceánicas, como el océano Atlántico, a lo largo de antiguos cinturones de montañas o cinturones orogénicos. Esto fue fundamental para entender los procesos de formación y resquebrajamiento de los supercontinentes. Esta última idea o concepto implica que la litósfera, de alguna manera, está preconditionada y debilitada en aquellas regiones que antes fueron expuestas a procesos de formación de montañas y de rifting, fenómeno de extensión que puede generar la formación de una cuenca oceánica, como el Atlántico. Estas antiguas regiones de rifting y de formación de montañas serán las más susceptibles en caso de futuros episodios de deformación.

El ciclo de Wilson, también llamado ciclo tectónico de placas, que se acopla con el denominado ciclo de los supercontinentes, es sin duda una de las concepciones fundamentales de la teoría de la tectónica de placas. Por esta razón, en seguida se hará referencia a las ocho etapas que hoy se reconocen en el ciclo de Wilson, que se extienden desde el momento de inicio de la apertura hasta cuando culmina el cierre de una cuenca oceánica (Wilson *et al.*, 2019). Estas ocho etapas son las siguientes:

- (1) Cuenca de rift (ejemplo actual: África Oriental).
- (2) Margen pasivo joven (ejemplo actual: mar Rojo).
- (3) Margen pasivo maduro (ejemplo actual: océano Atlántico).
- (4) Subducción oceánica (ejemplo actual: océano Pacífico).
- (5) Subducción madura y colisión temprana (ejemplo actual: mar Mediterráneo / mar Negro)
- (6) Orogéno continental (ejemplo actual: montes Himalaya).
- (7) Continente estable (ejemplo actual: África subsahariana)
- (8) Cuenca cratónica (ejemplo actual: Siberia occidental).

Un esquema ilustrativo de estas ocho etapas del ciclo de Wilson se ilustra en la figura 12.

El ciclo de Wilson o ciclo tectónico de placas es una herramienta poderosa para las ciencias naturales, y particularmente para la geología, debido a que cada una de las etapas del ciclo de Wilson condiciona la formación de



**Figura 12.** Esquema ilustrativo de las ocho etapas que conforman el ciclo de Wilson. Modificado de Wilson *et al.*, 2019

determinados materiales geológicos. Esto significa que en cada una de esas etapas del ciclo de Wilson se forman unas asociaciones de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas y unos recursos naturales no renovables característicos de cada etapa. Un ejemplo relacionado con este último aspecto son los grandes depósitos de cobre asociados al desarrollo de la etapa cinco del ciclo de Wilson.

Finalmente, es importante señalar que las regiones que hoy se asocian con alguna de las etapas del ciclo de Wilson son de gran importancia para la geología, debido a que constituyen una especie de laboratorio natural

en donde podemos documentar los procesos que allí se desarrollan. Esto último es crucial, puesto que, de esta manera, es posible coleccionar información que sirve de referencia en el marco de estudio de los materiales geológicos más antiguos, o tal como fue formulado por uno de los padres de la geología moderna, James Hutton: «El presente es la clave del pasado». Aunque este principio es fundamental en geología, vale la pena aquí aclarar que su aplicación es igualmente restringida, considerando que algunas condiciones del pasado geológico pudieron haber sido muy diferentes de las condiciones actuales (Zheng y Zhao, 2020).



Cadena montañosa sobre la Cordillera Central en cercanías de La Dorada, Caldas.

## Minerales, rocas y fósiles

De los 118 elementos químicos que conocemos los seres humanos, y que usualmente chequeamos en la tabla periódica de los elementos, 92 de ellos se consideran naturales, del hidrógeno al uranio, presentes en nuestro planeta en cantidades detectables. Entre esos 92 elementos químicos naturales hay unos abundantes, como hierro, oxígeno, silíceo, magnesio, azufre, níquel, calcio y aluminio, y otros presentes relativamente en muy pequeñas proporciones. De estos últimos elementos, los de menor abundancia son el astato, el francio, el protactinio y el tecnecio. Por ejemplo, se considera que en el planeta Tierra podría haber una cantidad de francio no superior a 30 gramos. En cuanto a los elementos transuránicos, es decir, aquellos elementos químicos con número atómico superior a 92, como el neptunio y el plutonio, su presencia en el planeta se ha generado fundamentalmente de manera artificial, por ejemplo, por la vía de las reacciones nucleares.

Los elementos químicos naturales se combinan para dar origen a la formación de minerales que pueden llegar a tener tamaños tan pequeños que solo se los puede observar con microscopios electrónicos; o pueden tener tamaños tan grandes como los de los minerales encontrados en la llamada cueva de los cristales en Naica (Estado de Chihuahua, México), que pueden alcanzar hasta 11 metros de longitud. Lo mencionado anteriormente permite deducir que los minerales se componen de uno, dos o más elementos químicos; y que, a su vez, las rocas se componen de minerales, junto con otros posibles componentes no minerales o fragmentos de rocas. En las próximas líneas enfatizaremos en estas definiciones y profundizaremos un poco más en el mundo de los minerales, las rocas y los fósiles.



Detalle de material de cuarzo en roca.

### Una mirada al mundo de los minerales

Un mineral se define como una sustancia sólida presente en la naturaleza con una composición química y una estructura cristalina definidas y generalmente derivadas de procesos naturales inorgánicos. Actualmente existen alrededor de 5000 especies minerales reconocidas por la Asociación Internacional de Mineralogía; pero, si nos transportamos al pasado de nuestro planeta, se observa que en tiempos remotos el número de estas especies era bastante reducido.

Según Hazen y Ferry (2010), el número de minerales en la era prenebular, hace más de 4600 millones de años, no sobrepasaban unos 12 minerales; mientras que para la era de la acreción planetaria, hace más de 4550 millones de años, este número se incrementó hasta llegar a unas 250 especies minerales. Tiempo después, cuando se generaron rocas que formaron las partes más antiguas de las actuales masas continentales, y cuando empezó el predominio de la tectónica de placas litosféricas, hace unos 3000 millones de años, el número se incrementó hasta llegar a unas 1500 especies minerales, y, finalmente, como consecuencia

de la transformación del planeta en presencia de organismos vivos, el número de minerales progresivamente alcanzó las cerca de 5000 especies minerales que hoy conocemos.

La mineralogía es la ciencia que estudia los minerales, su origen, su estructura, sus propiedades, su impacto en el medioambiente y sus aplicaciones industriales. Los minerales son fuente importante de información para cualquier geólogo, tanto para entender los procesos que dieron origen a su formación como para usarlos como guías en la exploración de recursos minerales. En este sentido, es importante resaltar que las diferentes condiciones físicas y químicas del medio determinan la formación de los minerales. Por ejemplo, el diamante es un mineral que suele formarse en medios de altas presiones, con temperaturas comparativamente bajas; pero cuanto más bajas son las presiones, este mineral se transforma en grafito. Este ejemplo puede ser usado como base para afirmar que los minerales son una fuente de información que sirve para documentar la trayectoria que ha podido tener una determinada roca que contiene los minerales de nuestro interés, considerando que es posible establecer cuáles minerales en una roca se

formaron en medios de mayor profundidad, cuáles en medios de menor profundidad e incluso cuáles se formaron recientemente cuando la roca se encontraba cerca de la superficie terrestre.

Para realizar este tipo de estudios se acude al diseño y al uso de diagramas de fases minerales, que ayudan a entender mejor la trayectoria de una roca desde las profundidades hasta que alcanza la superficie. Además, si usamos algunos métodos geocronológicos, es posible calcular durante cuántos millones de años una roca se encontraba a mayor profundidad y hace cuántos millones de años la roca alcanzó la superficie terrestre. Esto último es una tarea fundamental para conocer adicionalmente el proceso de formación del actual relieve.

Los minerales se pueden clasificar según su composición química en las siguientes clases: (a) elementos nativos; (b) silicatos, que conforman el grupo de minerales más abundante en la tierra; (c) sulfuros; (d) carbonatos, nitratos y boratos; (e) sulfosales; (f) haluros; (g) sulfatos y cromatos; (h) óxidos e hidróxidos; (i) volframatos y molibdatos; (j) fosfatos, arseniats y vanadatos (véase la figura 13).



**Figura 13.** Aspecto general de algunos minerales de la clase de los silicatos, carbonatos y sulfatos



Las sustancias sólidas o líquidas, de origen orgánico o inorgánico, con aspecto parecido a los minerales, pero sin una estructura cristalina definida (sustancias amorfas), se llaman mineraloides. Como ejemplos de mineraloides podemos mencionar el ámbar, una resina fosilizada de origen vegetal; la obsidiana, un vidrio de origen volcánico; y el ópalo, una sustancia de composición similar a la del cuarzo, pero con presencia de moléculas de agua. Los minerales creados naturalmente por criaturas vivas, sean especies unicelulares o multicelulares, se denominan biominerales, y se los considera un subconjunto del reino de los minerales. Los minerales sintéticos son aquellos elaborados por el hombre en un intento por emular en el laboratorio los procesos naturales que forman los minerales.

Las propiedades físicas de los minerales, usadas para identificar o distinguir minerales, dependen de la composición química y de la estructura

atómica de cada mineral. De estas propiedades físicas que se analizan en un mineral para identificarlo y estudiarlo plenamente, se señalan las siguientes: (1) las propiedades controladas por la simetría, a la que se hará alusión más adelante; (2) las propiedades termales, es decir, el flujo de calor en un mineral; (3) las propiedades magnéticas; (4) las propiedades eléctricas, y (5) las propiedades radioactivas. Adicionalmente al estudio de esas propiedades físicas de los minerales, también se suelen estudiar otros aspectos, tanto físicos como químicos, mediante el uso de herramientas analíticas, como la microscopía óptica y electrónica (SEM-microscopía electrónica de barrido; véase la figura 14), la difracción de rayos X y la microsonda electrónica (para determinar la química del mineral), entre otros. A continuación, se presentan algunas de las propiedades relacionadas con la simetría de los minerales, las más frecuentes al momento de identificar los minerales que llegan a nuestras manos:



**Figura 14.** Microscopio electrónico del Parque Tecnológico de Guatiguará de la UIS (Piedecuesta), usado en el estudio de minerales y demás muestras geológicas

(a) El color, propiedad derivada de la absorción (o su ausencia) de diferentes longitudes de onda de luz por parte de un mineral de determinada composición química.

(b) La raya, que se define a partir del color del polvo que genera el mineral cuando se lo roza sobre la superficie de un azulejo de porcelana blanca sin esmaltar.

(c) El lustre, aspecto de la superficie del mineral bajo el reflejo de la luz.

(d) El hábito cristalino, que describe la forma general de un cristal.

(e) El clivaje, una propiedad de los minerales para romperse a lo largo de planos específicos que suelen ser paralelos a las caras de los cristales.

(f) La partición, como una característica que suele presentarse en minerales que no tienen clivaje.

(g) La fractura, que se define como el astillado de un mineral.

(h) La tenacidad, que es la resistencia de un mineral y la facilidad con que se romperá, partirá, desmenuzará o cambiará de forma.

(i) La dureza, una propiedad que refleja la resistencia contra el agrietamiento, y está determinada por la presencia de un enlace débil en el mineral. Un referente para medir, de alguna manera, la dureza de los minerales es la conocida escala de dureza de Mohs (véase la tabla 1).

(j) La gravedad específica, que indica cuántas veces más pesa el mineral en comparación con una cantidad igual de agua.

Para finalizar, vale la pena resaltar la importancia atribuida a los minerales en el origen de la vida en nuestro planeta. Según Sowerby *et al.* (1998), las superficies cristalinas de los minerales han sido incluso consideradas clave para seleccionar y organizar moléculas; es decir, los minerales posiblemente jugaron un papel muy importante para pasar de los procesos geoquímicos a los procesos bioquímicos. Se considera que las superficies de los minerales facilitaron la selección y la concentración de las moléculas que existieron en el caldo prebiótico (donde surgió la vida), que se combinaron entre sí como entidades autorreplicantes: las superficies de algunos minerales sirvieron como plataformas para pasar del metabolismo a la genética. En este mismo sentido, Ferris *et al.* (2005) proponen que los minerales arcillosos podrían haber absorbido, seleccionado, organizado y catalizado los componentes esenciales o básicos de la maquinaria genética de la vida.

## Escala de Mohs

1	Talco Friable bajo la uña
2	Yeso Rayado por la uña
3	Calcita Rayado por una pieza de moneda
4	Fluorita Se puede fácilmente rayar con un cuchillo
5	Apatito Rayado con un cuchillo
6	Ortosa Rayado con una lima
7	Cuarzo Raya un cristal
8	Topacio Rayado con herramientas con tungsteno
9	Corindón Rayado por el carburo de silicio
10	Diamante Rayado por otro diamante

Tabla 1. Escala de dureza de Mohs





Estructura geológica al paso del río Sogamoso por Betulia.

## Una mirada al mundo de las rocas

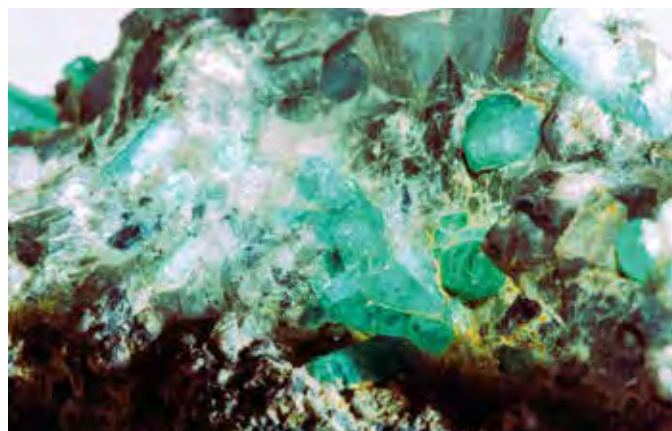
En este apartado se presentarán brevemente los tipos de rocas existentes, no sin antes recordar que una roca es un material sólido compuesto principalmente por minerales —que pueden tener formas bien definidas o no, como los cristales, los granos minerales irregulares o los fragmentos de estos— y por fragmentos de otras rocas. Según el origen o el mecanismo de formación de las rocas, es posible diferenciar tres tipos: rocas sedimentarias, rocas ígneas y rocas metamórficas. A continuación, presentaremos algunas generalidades sobre cada uno de estos tres tipos de rocas.

### Las rocas sedimentarias

Estas rocas se forman por la consolidación de detritos de minerales, fragmentos de rocas y precipitados químicos, y también por la compactación de remanentes de plantas o animales. Además, en su historia geológica, estas rocas nunca superaron una temperatura de  $\sim 210$  °C. Aproximadamente, el 75 % de las rocas observadas en la superficie terrestre son rocas sedimentarias, aunque el 95 % de las rocas



Mineral.



Esmeraldas en roca.

Rocas que se transforman en joyas, a partir de la virtud de la luz, el colorido y la belleza en sus formas, iridiscencia y rareza.



presentes en la corteza terrestre suelen ser rocas ígneas y metamórficas, las cuales, comúnmente, quedan cubiertas por las rocas sedimentarias.

Estos materiales se suelen depositar en ambientes continentales, como abanicos aluviales, lagos, ríos y glaciares; en ambientes transicionales, como dunas, playas y deltas; y ambientes marinos, que comprenden arrecifes, abanicos submarinos y plataforma continental, entre otros. Usando el criterio de ambiente de depositación, es posible clasificar las rocas sedimentarias en rocas de ambiente continental, transicional o marino (véase la figura 15). Las rocas sedimentarias, debido a sus bajas temperaturas, inferiores a  $\sim 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ , son rocas favorables para la formación y la acumulación de hidrocarburos, como petróleo, gas u otros; por tanto, su interés para la industria petrolera es evidente.

En virtud de su saber especializado, el geólogo lee las características de las rocas: partición, fractura, tenacidad, dureza, entre otras.



Estructura rocosa propia de las montañas del Chicamocho.



Paisaje geológico del páramo de Almorzadero.



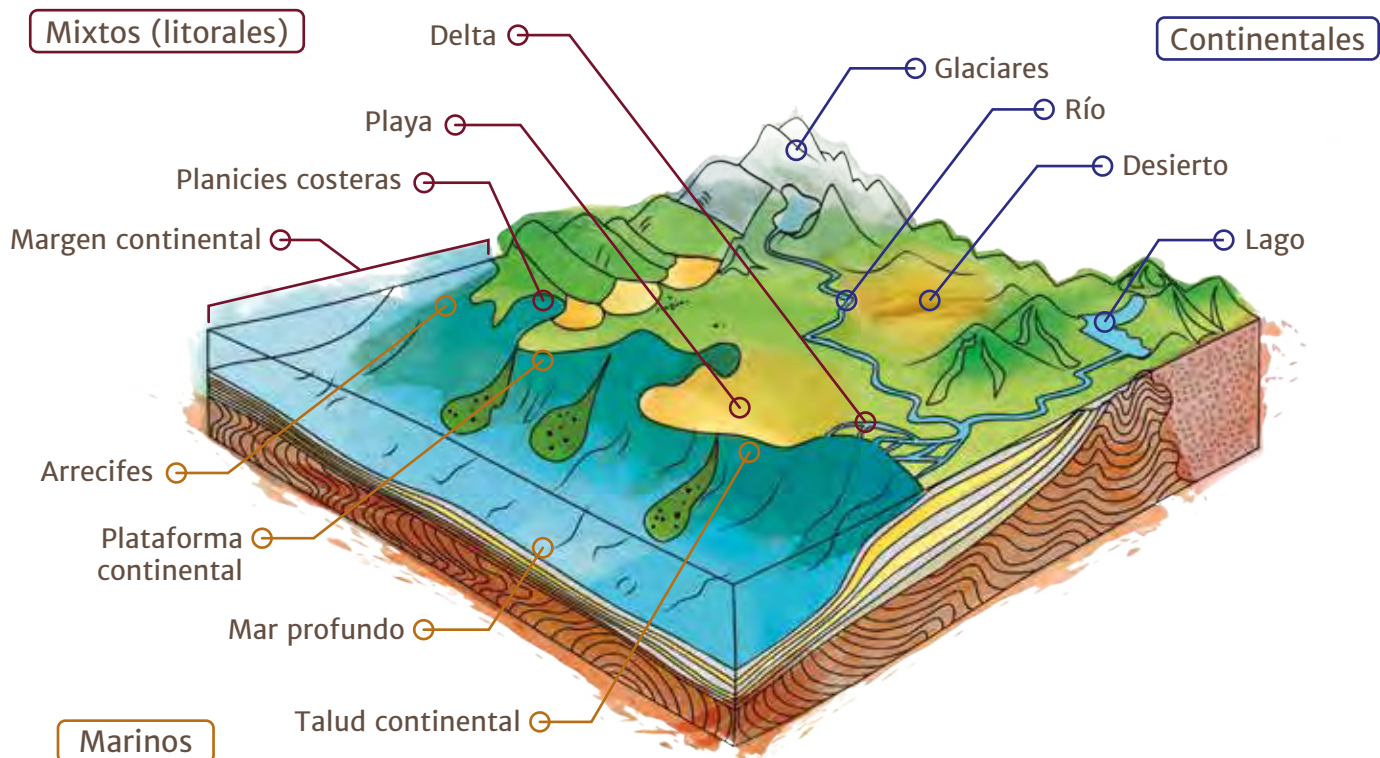
Laguna de Cunta, en el corazón del páramo de Santurbán.

## Las rocas ígneas

Las rocas ígneas se producen por la cristalización de magmas, o roca fundida, que suelen alcanzar temperaturas variables entre 800 °C y 1200 °C (aunque existen magmas excepcionalmente más fríos y también más calientes). Estos fundidos son muy variables en su composición química y, por ende, en sus propiedades físicas, como, por ejemplo, la viscosidad. Generalmente, suelen formarse en el manto o en las zonas más profundas de la corteza terrestre. Las características del magma dependerán del material que se haya fundido y de su cantidad o porcentaje de fusión. Por ejemplo, la fusión de las rocas del manto que suelen ascender desde el límite núcleo-manto hasta la base de la litósfera —procesos que se asocian con la actividad de plumas mantélicas y puntos calientes— suele generar unos volúmenes enormes de magma.

Si ese gran volumen de fundido logra llegar a la superficie terrestre causa extensas inundaciones; pero si se descarga en el fondo del océano forma enormes acumulaciones que se apilan hasta crear una corteza oceánica gruesa, como el piso oceánico del mar Caribe. Incluso el fundido puede apilarse tanto como para formar una isla, así como sucedió en el proceso de Formación de Galápagos, con rocas ígneas formadas por magmas que se han denominado komatiíticos y toleíticos.

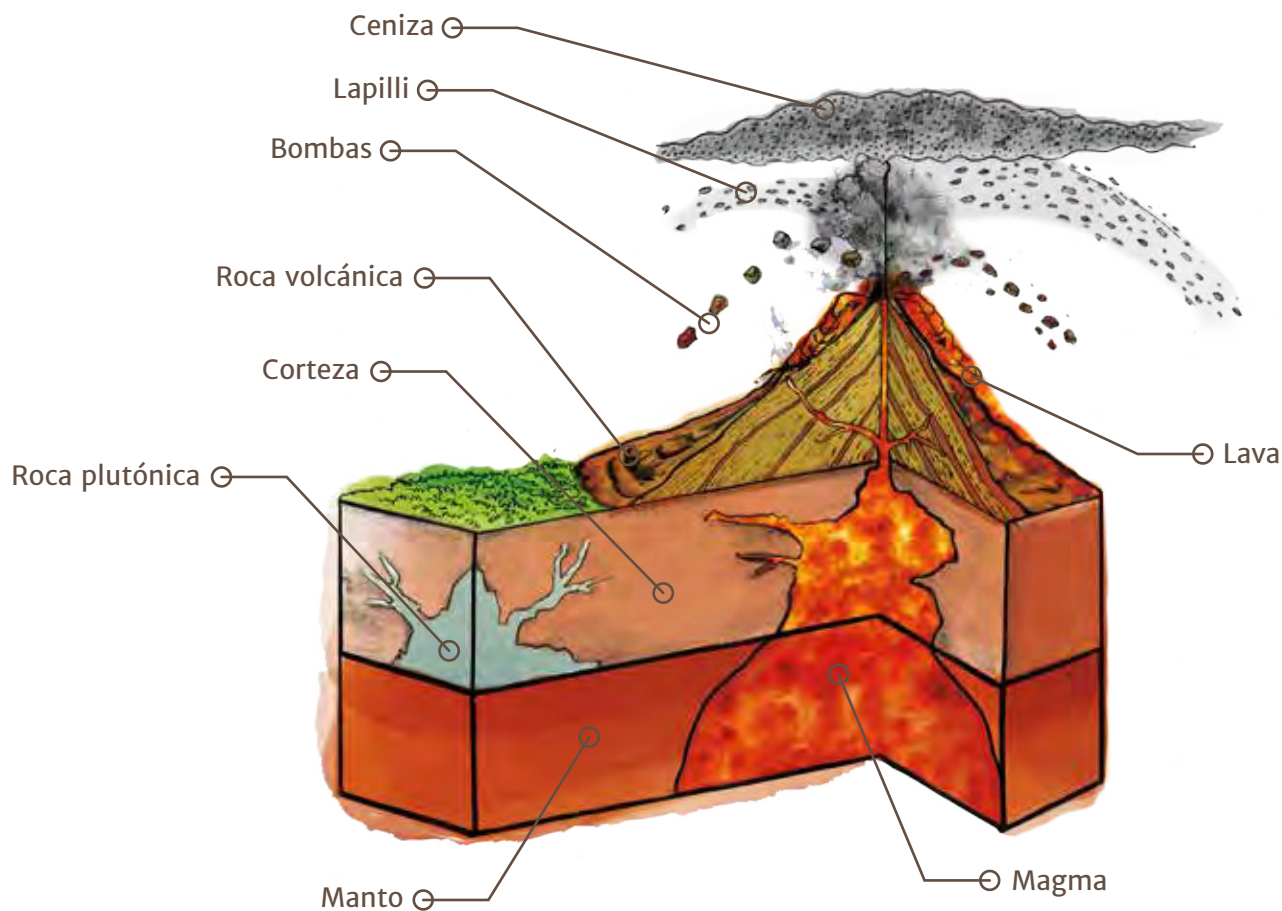
Contrario a la formación de esos grandes volúmenes de magmas, también se presentan eventos magmáticos relacionados con bajos porcentajes de fusión parcial, lo que lleva a formar volúmenes menores de magmas, como es el caso de los fundidos o magmas denominados alcalinos y carbonatíticos. Finalmente, los magmas que se forman



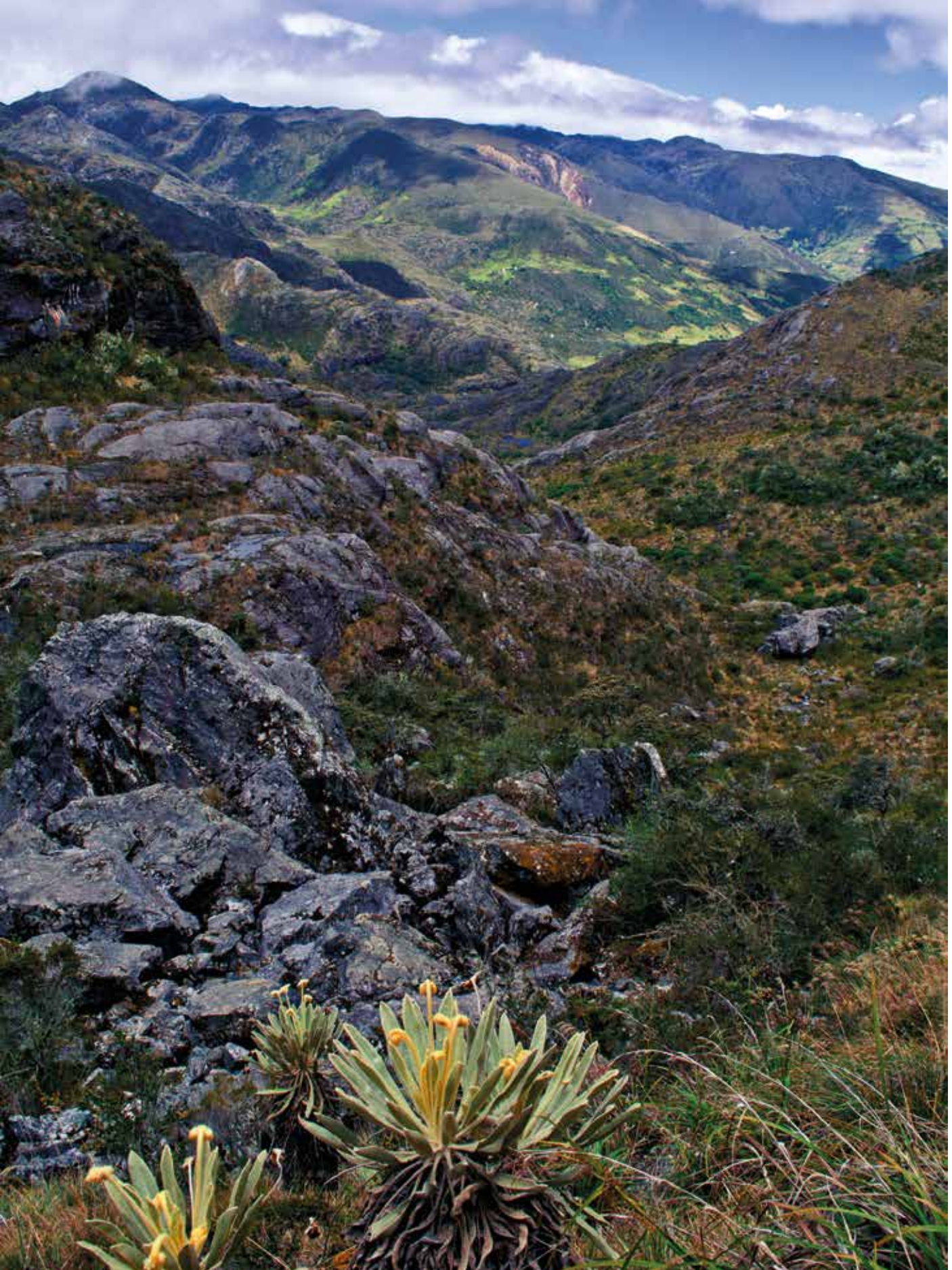
**Figura 15.** Esquema ilustrativo de los ambientes de depósito, donde se forman las rocas sedimentarias

en ambientes de choque de placas en que se desarrollan procesos de subducción, como el caso del eje volcánico de la Cordillera Central en Colombia, suelen generar magmas de volúmenes variables, que se han denominado magmas calco-alcalinos.

Cada uno de los diferentes tipos de magmas antes mencionados (komatiítico, toleítico, calco-alcalino, alcalino o carbonatítico) puede dar lugar a la formación de rocas ígneas plutónicas, cuando el magma cristaliza en profundidad, y volcánicas (véase la figura 16), cuando suelen alcanzar la superficie terrestre y cristalizarse. Los magmas más ricos en agua y generalmente los más ricos en óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) pueden generar importantes explosiones cuando ascienden desde las profundidades y se aproximan a la superficie terrestre; es así como dan lugar a una variedad de rocas denominadas volcánico-clásticas, comunes durante la explosión y la emisión de gas, ceniza, polvo y bloques de roca durante la actividad de un volcán.



**Figura 16.** Tipos de rocas ígneas, según el ambiente de cristalización de los magmas



Aspecto de una roca ígnea plutónica, formada por el enfriamiento del magma. Laguna de Páez en California.



Aspecto de una roca ígnea volcánica, formada por el enfriamiento de lava. El Cumbal, Nariño.

### Las rocas metamórficas

Las rocas metamórficas se forman debido a cambios físicos, como la presión y la temperatura, que afectan a las rocas precursoras, como las rocas sedimentarias, ígneas e incluso otras rocas metamórficas. Estos procesos someten las rocas precursoras a temperaturas de entre  $\sim 210\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En consecuencia, se genera la formación de nuevos minerales y se producen cambios en la textura y en la estructura de las rocas.

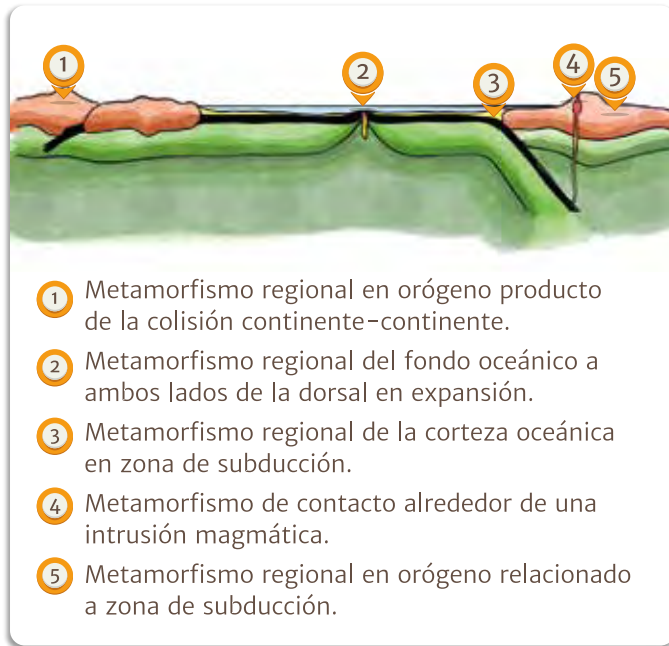
Los ambientes en la corteza terrestre donde se pueden formar las rocas metamórficas son los siguientes:

- Ambientes colisionales, es decir, donde se forman sistemas montañosos por choques entre placas, tal como ocurre en el actual sistema montañoso andino o sistema orogénico andino.
- Ambientes de subducción, en donde las rocas del piso oceánico son transportadas hacia el interior del planeta por subducción.

- Ambientes extensivos expuestos al intenso flujo de calor, como aquellos observados en las dorsales oceánicas, donde se forma y crece el piso oceánico.

Cada uno de esos tres ambientes es favorable para producir rocas metamórficas (véase la figura 17), pero cada uno de ellos tiene condiciones de presión y temperatura diferentes. Por ejemplo, en los sistemas orogénicos, como el andino, las rocas son apiladas unas sobre otras, debido a las fuerzas compresivas que se originan por el choque de placas. Esto genera engrosamiento de la corteza terrestre, que produce que las rocas sufran progresivamente un aumento tanto de la presión como de la temperatura. Las rocas formadas en este ambiente se relacionan con un metamorfismo regional denominado de serie barroviense (véase la figura 17).

Las rocas metamórficas se clasifican según varios criterios. Así, se las puede ordenar según el tipo de litología precursora y el grado de



transformación alcanzado como consecuencia del aumento de la presión y la temperatura (cambios texturales y estructurales), y también según el ambiente tectónico en donde tuvo lugar el proceso de metamorfismo. El progresivo aumento de la presión y la temperatura que afecta a estas rocas hace que ellas abandonen el campo sedimentario y que formen una roca metamórfica de muy bajo grado de metamorfismo, que suele denominarse pizarra. Una vez que su transformación se intensifica por el aumento de presión y temperatura, pasa a formar una filita; en seguida, un esquisto; luego, un gneis, y, finalmente, puede llegar a fundirse hasta formar un magma (véase la figura 18).

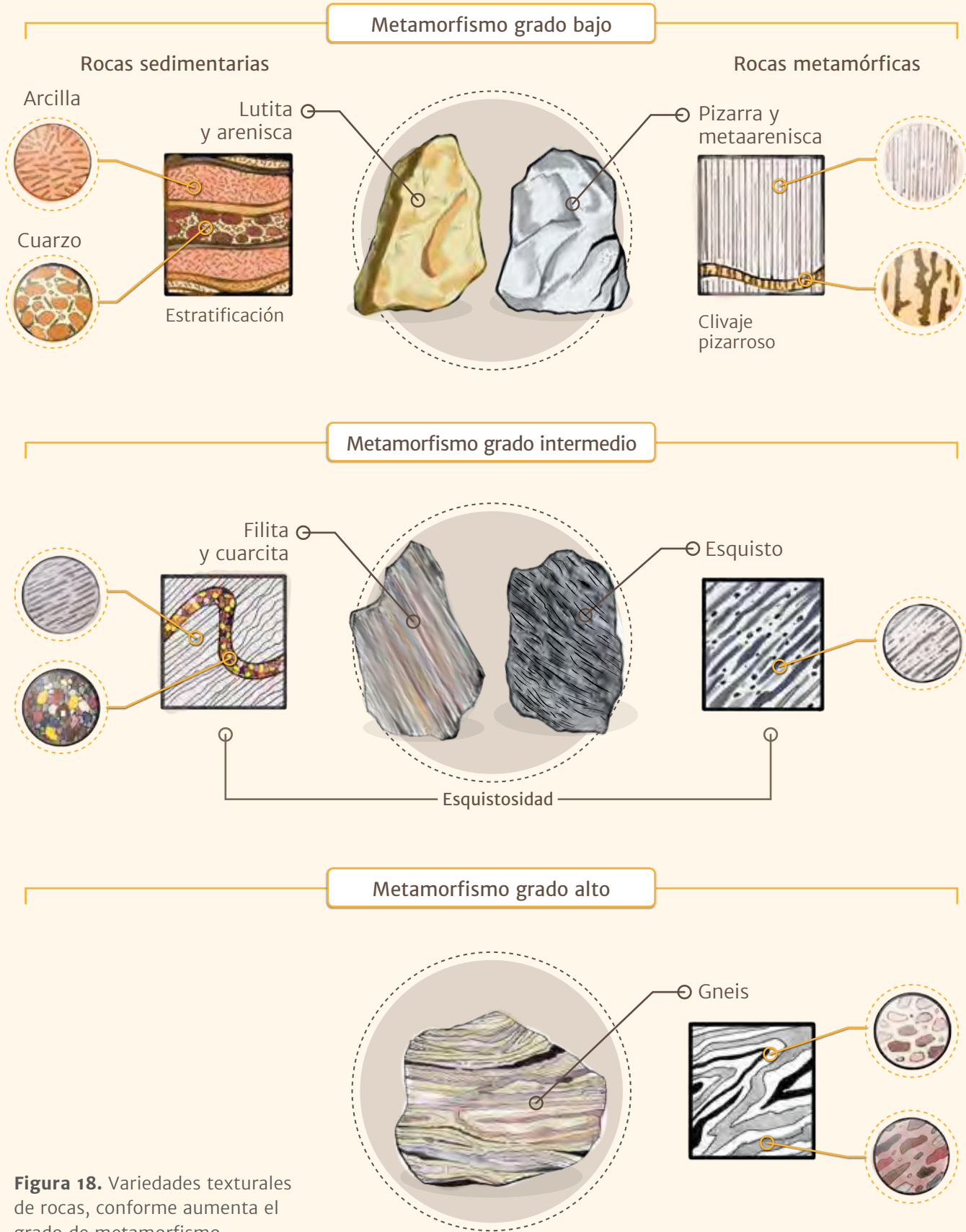
**Figura 17.** Ambientes tectónicos en donde se forman rocas metamórficas



Filas de la cadena montañosa en el páramo de Almorzadero.



### Rocas metamórficas

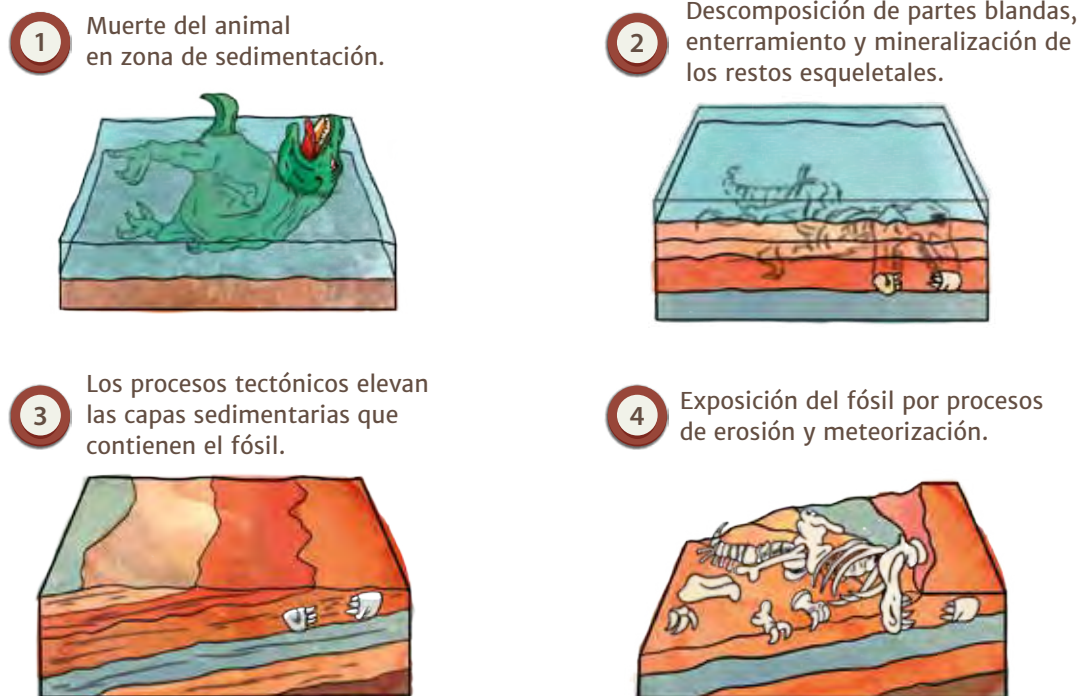


**Figura 18.** Variedades texturales de rocas, conforme aumenta el grado de metamorfismo

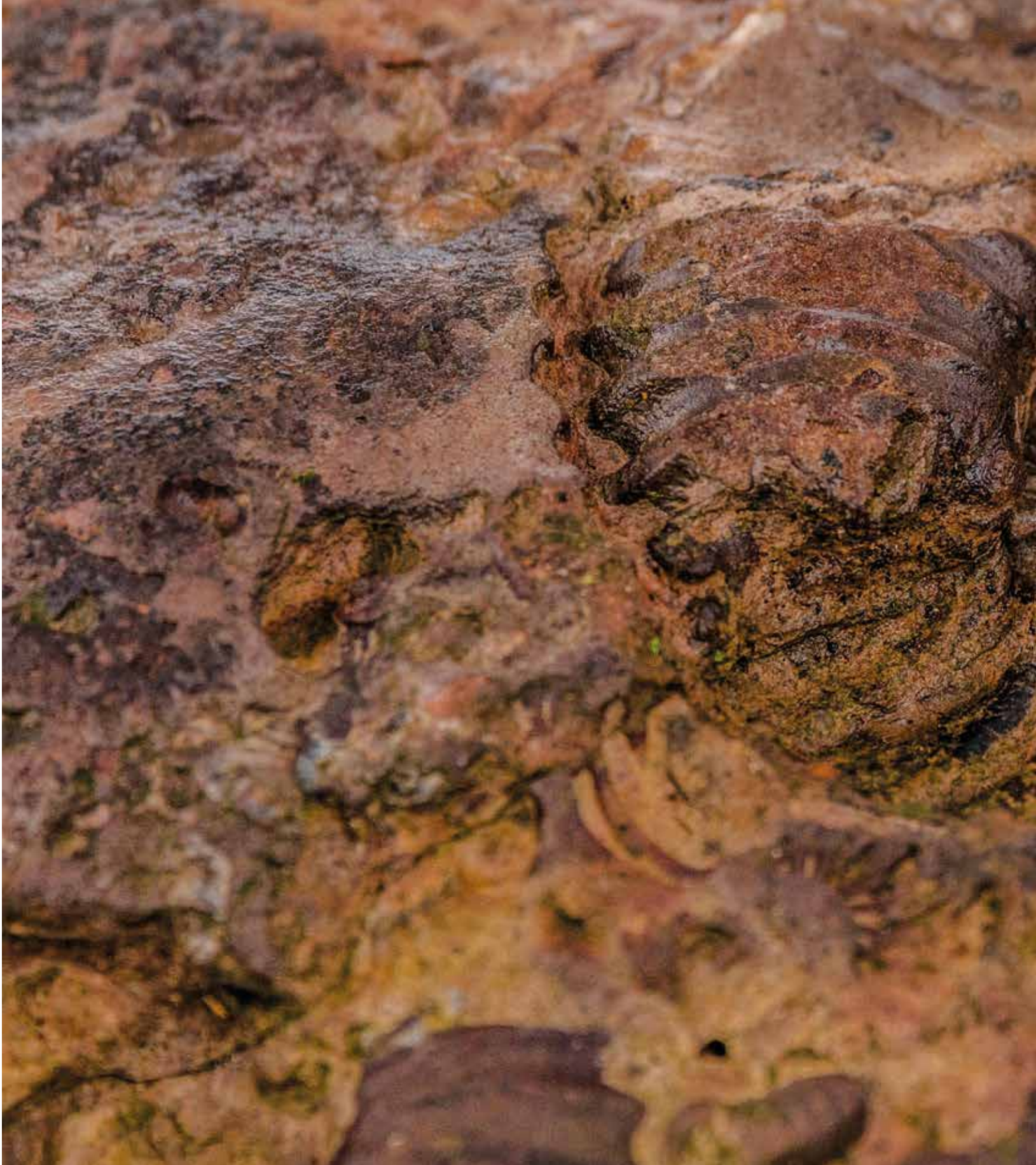
## Una mirada al mundo de los fósiles

El estudio de los restos de flora y fauna o de las huellas de la actividad orgánica de la antigua biota del planeta es el campo de estudio de los paleontólogos. El proceso para formar estas huellas fósiles, en general, depende en gran medida tanto del organismo como del sedimento. El proceso de fosilización es un proceso que implica cambios físicos y químicos en un organismo desde su muerte hasta su descubrimiento en forma de fósil en la superficie. En términos generales, para que se produzca el proceso de fosilización se debe pasar por las siguientes etapas:

- Descomposición de las partes blandas del animal o su consumo por parte de animales carroñeros.
- El esqueleto, el caparazón o los fragmentos de hueso son cubiertos por sedimentos que los protegen y evitan que sean desintegrados.
- Soluciones silíceas formadas en las rocas se precipitan sobre los huesos, y, en consecuencia, los endurecen y los preservan.
- Las rocas con los fósiles ya formados son sometidas a procesos tectónicos que terminan exponiendo las rocas a la erosión hasta llegar a exponer los fósiles a la vista del ser humano (véanse las figuras 19 y 20).



**Figura 19.** Ilustración del proceso de fosilización y su posterior proceso de exposición en la superficie



**Figura 20.** Aspecto general de un fósil de amonita, un antiguo molusco de los mares que existió en el sector de Guane corregimiento de Barichara (Santander) durante el Cretácico





Inicio de la formación del Cañón del Chicamocha en el municipio de Onzaga.

La conformación del paisaje nos permite ubicarnos en la historia escrita en cada risco y en cada depresión.

## El tiempo geológico

Con seguridad, todos hemos observado durante algunos de nuestros viajes terrestres la presencia de rocas dispuestas a manera de capas que se sobrepone una sobre otra, como sucede, por ejemplo, en el paisaje del Cañón del Chicamocha o en el paisaje observado por la vía de San Gil a Socorro. En ocasiones, estas rocas dispuestas en capas pueden ser cortadas, atravesadas, por otros tipos de rocas que parecieran haber penetrado con posterioridad las capas referidas (véase la figura 21). Estas observaciones generales, que conducen a reconocer variedades de rocas y a establecer las relaciones entre ellas (cuáles rocas pudieron haber estado primero y cuáles pudieron irrumpir después), son posiblemente el ejercicio más importante en geología para definir tiempos relativos o edad relativa; es decir, aunque no podamos cuantificar

la edad de cada tipo de roca, al menos podemos establecer cuál roca o litología pudo formarse primero y cuál después. Si, además de este ejercicio (edad relativa), quisiéramos cuantificar la edad de las rocas (edad absoluta), entonces tendríamos que acudir a otras estrategias o herramientas, como, por ejemplo, hacer uso de la geocronología o la paleontología.

Antes de hacer alusión a la geocronología y la paleontología como herramientas que nos ayudan a cuantificar edades absolutas de las rocas, merece la pena subrayar la importancia de esta tarea global en la que estamos comprometidos los geólogos: reconstruir el pasado de nuestro planeta, para apoyar las decisiones que permitan garantizar nuestro futuro. En este sentido, si determinamos todos los tipos de rocas que se



**Figura 21.** Edad relativa de las diferentes unidades de rocas, a partir de sus relaciones de corte



**Figura 22.** Fósil de amonita, muy común en rocas sedimentarias de la era Mesozoica, observadas en diferentes sectores del departamento de Santander

formaron en diferentes puntos geográficos del mundo en un tiempo determinado (por ejemplo, cuáles rocas se formaron o incluso cuáles no se formaron hace 500 millones de años), entonces podemos reconstruir los diferentes ambientes que prevalecieron en diferentes lugares del planeta para entonces, y, de la misma manera, podemos reconstruir la paleogeografía global para un tiempo determinado.

La reconstrucción de esos paleoambientes y, por consiguiente, de la sucesión de cambios paleogeográficos que han afectado a un sector de la corteza terrestre, o a un territorio, es quizá la base de datos más poderosa que tenemos para entender cómo ha evolucionado nuestro planeta y para intentar proyectar su posible devenir. Esto es algo fundamental para resolver muchas tareas o necesidades presentes y futuras de la humanidad, debido a que permite definir las tendencias o los ciclos que han afectado y que, seguramente, afectarán en el futuro a nuestro planeta, como, por ejemplo, el cambio climático. Asimismo, es de gran ayuda para definir los rangos de

temporalidad más fértiles en la formación de los recursos no renovables que requiere la sociedad, como cobre, petróleo, diamantes, fósforo, etcétera, entre muchos otros aspectos.

Dos importantes métodos para determinar la edad absoluta de los minerales o rocas son la geocronología y la paleontología. El primero permite datar eventos o procesos geológicos, usando el proceso natural de desintegración radioactiva de átomos de elementos presentes en minerales o rocas. Este proceso funciona como una especie de reloj natural presente en algunos materiales geológicos y que sirve para determinar la antigüedad de una roca. El segundo método se basa en el registro paleontológico presente en las rocas. Aunque el objetivo principal de la paleontología es reconstruir las diferentes formas de vida a lo largo de la historia del planeta, esta ciencia resulta muy útil para establecer la edad de las rocas, debido a que algunos fósiles presentes en ellas funcionan como guías que indican en cuál periodo existieron. Por ejemplo, en Santander, es muy

común encontrar fósiles de amonitas (véase la figura 22), un tipo de moluscos muy abundantes en sedimentos marinos de la era Mesozoica, perteneciente al eón fanerozoico (véase la figura 23), especialmente durante el periodo Cretácico, que inicia hace 146 millones de años y termina hace unos 66 millones de años.

Luego de haber expuesto cómo los geólogos podemos cuantificar o determinar la edad de las rocas, a continuación, se hará una referencia a la división general del tiempo geológico y a los eventos más característicos de la evolución de nuestro planeta. Para tal fin, debemos empezar señalando que el tiempo geológico terrestre se ha dividido en las siguientes unidades de tiempo mayores, denominadas eones (véase la figura 23): Hádico, hace 4600-4000 millones de años; Arcaico, hace 4000-2500 millones de años; Proterozoico, hace 2500-540 millones de años; y Fanerozoico, hace 540 millones de años hasta la actualidad, y que se subdivide en las siguientes tres eras: Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica.

### ***El Eón Hádico***

Este eón abarca un periodo de unos 600 millones de años (véase la figura 23), y coincide con el inicio de nuestro planeta. Durante este periodo se formó la Luna, hace aproximadamente 4500 millones de años, y también tuvo lugar el bombardeo intenso tardío, hace alrededor de 4000 millones de años. Este último es considerado el responsable de la mayor cantidad de cráteres que tiene actualmente la superficie lunar.

En la Tierra muy pocos lugares dejan ver rocas del Hádico. Por ahora, entre algunas de las rocas más antiguas del planeta, se destacan unas rocas de aspecto verdoso que se han denominado cinturón de rocas verdes de Nuvvuagittuq, que se observan en sectores concretos de la región de Quebec (Canadá), y se considera que tienen una edad de 4280 millones de años. Entre otras rocas muy antiguas del planeta, se destacan igualmente unas rocas de aspecto bandeado que se han



Un intenso bombardeo de meteoritos hace unos 4000 millones de años es el probable causante de los miles de cráteres que hoy conforman el paisaje de la superficie lunar.





denominado el Gneis de Acasta. Estas rocas, que afloran, en Territorios del Noroeste, entidad federal de Canadá, tienen edades entre 4200 y 4100 millones de años.

Aunque existen otros sectores en el planeta con rocas antiguas, por ejemplo, en Australia y Groenlandia, definitivamente estas litologías mencionadas perfectamente clasifican para el Guinness World Records de las rocas más antiguas del planeta. Relacionado también con el Eón Hádico, se reporta el mineral terrestre más antiguo localizado en la región de Jack Hill (Australia occidental). Este mineral es conocido como zircón, un silicato de zirconio de fórmula química  $ZrSiO_4$ , con una edad de 4404 millones de años. Si bien este mineral debió formar parte de alguna roca muy antigua, de la misma edad del mineral, hoy hace parte de una roca aproximadamente 1404 millones de años más joven, pues normalmente las rocas que contienen este mineral tienen una edad de 3000 millones de años. La razón de esto es que la roca más antigua con la cual se cristalizó el zircón de 4404 millones de años se erosionó hasta desaparecer con posterioridad a su formación y, finalmente, terminó convertida en sedimentos que luego se transportaron, se depositaron, se enterraron y formaron esas nuevas rocas, comparativamente más jóvenes, que hoy contienen esos minerales más antiguos del planeta.

Los pocos registros de rocas y minerales del Eón Hádico dificultan la obtención de más datos que pudieran servir para reconstruir más detalles de la historia geológica de esa importante etapa de la evolución de nuestro planeta. A pesar de esto, hoy se sabe que al final de esa etapa existían ya las primeras moléculas autorreplicantes, es decir, al final de ese periodo se evidencia la presencia de vida muy primitiva en el planeta.

### **El Eón Arcaico**

Comprende un periodo de unos 1500 millones de años (véase la figura 23). Durante este periodo la atmósfera terrestre era predominantemente anóxica, característica que indica ausencia casi total de oxígeno, debido a que los organismos existentes en esa época aún realizaban fotosíntesis anoxygenica, es decir, sin liberación de oxígeno. Sin embargo, la aparición de los primeros organismos capaces de realizar fotosíntesis oxigenica surgió hace unos 2800 millones de años. Esta producción de oxígeno se encargó de aniquilar gran parte de los microorganismos anaeróbicos que dominaban en ese periodo. Esta época fue comparativamente más caliente y fue tectónicamente muy activa.

En el Arcaico comenzaron a aparecer las formas de vida más simples, tales como los procariotas, organismos unicelulares desprovistos de núcleo celular con material genético reunido en una zona denominada nucleóide. Entre estos organismos, se destacan las algas verde-azuladas (cianobacterias) y las bacterias. Estas últimas están presentes hoy en todos los hábitats de nuestro planeta, y son descendientes de esas bacterias (procariotas) que ya existían en nuestro planeta durante el Arcaico. Los procariotas son organismos precursores de los eucariotas, que sí están provistos de núcleo celular.



Estructura rocosa dentro de la cueva de La Vaca, en el municipio de Curití.

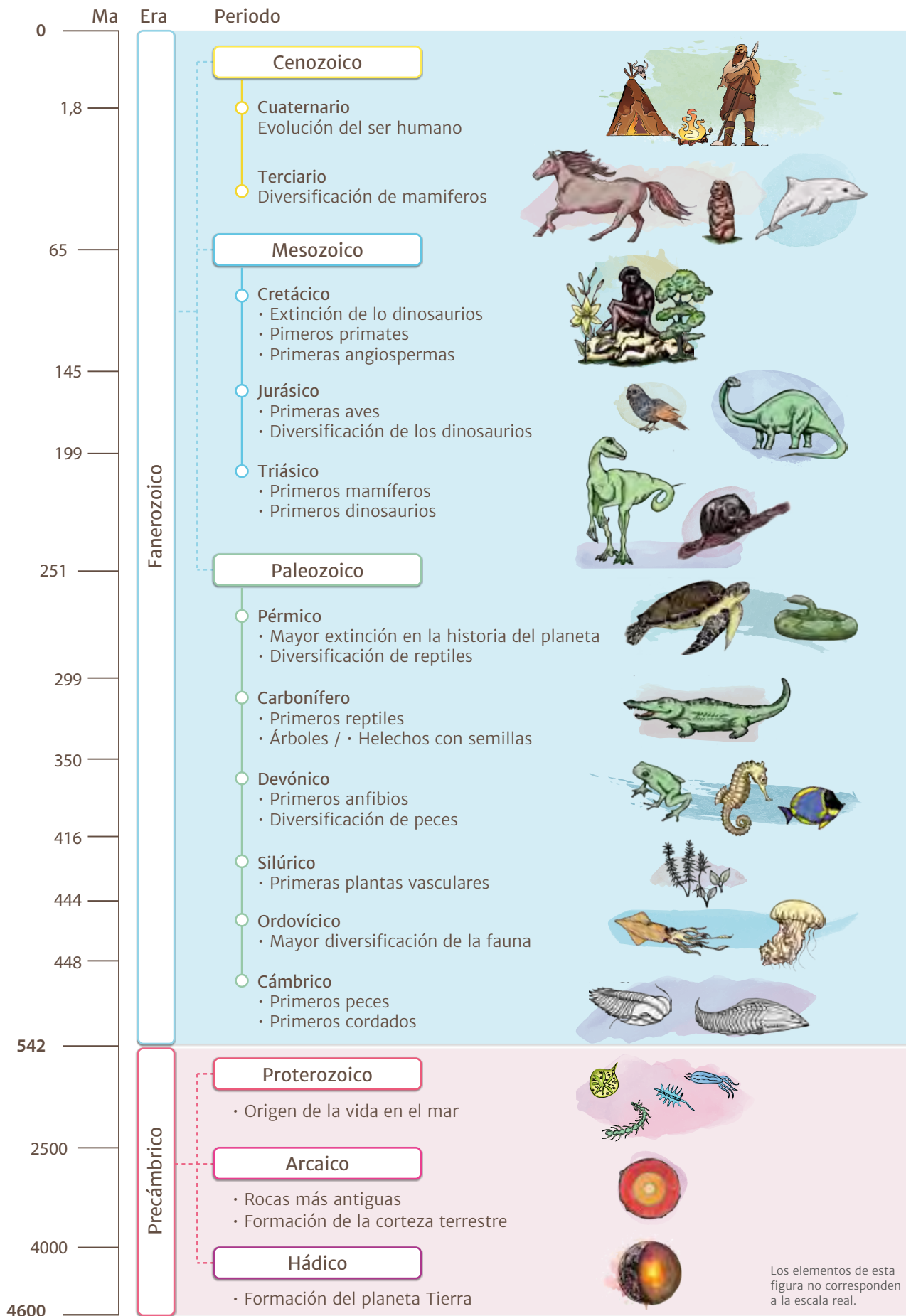


Figura 23. Tabla del tiempo geológico y sus eventos más distintivos en la evolución de nuestro planeta

### **El Eón Proterozoico**

Abarca un periodo de aproximadamente unos 1960 millones de años (véase la figura 23). Durante este periodo el planeta experimentó unos cambios sustanciales, como el incremento del oxígeno atmosférico, debido a una gran actividad biológica, especialmente de bacterias fotosintéticas. Este aumento de oxígeno atmosférico contribuyó significativamente a la formación de importantes depósitos de hierro bandeado, que son acumulaciones de hierro presentes en forma de bandas de óxidos de hierro intercaladas con bandas de sílex, material compuesto de cuarzo muy fino.

El aumento del oxígeno atmosférico afectó significativamente los organismos anaeróbicos que dominaban el planeta, para los que el oxígeno resultaba ser muy tóxico. Otro aspecto importante en este periodo es la menor duración de los días terrestres, calculados en 20 horas, debido a la mayor velocidad de rotación de la Tierra en esa época, pero con movimientos de traslación más lentos que hacían que un año terrestre durara 450 días. Al final del Proterozoico, concretamente en la denominada era Neoproterozoica, aparecieron las primeras células eucariotas, entre las que se destaca una especie de ameba con caparazón, *Melanocyrrillium hexodiadema*, que data de unos 750 millones de años atrás.

Con este periodo final del Proterozoico también se asocian unos organismos multicelulares complejos, denominados biota del periodo Ediacárico, que aparecieron después de una importante superglaciación que afectó al planeta durante casi 85 millones de años (entre 720 y 635 millones de años), y convirtió a nuestro hogar en una especie de bola de nieve o planeta blanco, es decir, nuestro planeta era muy diferente de ese planeta azul que hoy conocemos. El registro geológico del Proterozoico es mejor y más abundante que aquellos disponibles del Eón Arcaico. Estos dos eones, a su vez, tienen mejor registro geológico que el existente para el Eón Hádico.

### **El Eón Fanerozoico**

Se extiende en un periodo de aproximadamente unos 540 millones de años, que inicia hace unos 540 millones de años y cubre la actualidad (véase la figura 23). Durante este periodo el planeta experimentó una explosión en diversidad y formas de vida (aparecen los peces, los animales y las plantas terrestres, los animales aéreos). El Eón Fanerozoico se subdivide en las eras Paleozoica, Mesozoica y Cenozoica (véase la figura 23). En la era Paleozoica la vida floreció tanto en el agua como en la tierra (trilobites y reptiles). Durante el Mesozoico se desarrollaron formas de vida muy complejas que dieron origen a vertebrados, como los reptiles.



Paisaje de singular belleza en el complejo lagunar Los Verdes, páramo de Santurbán.



Durante el Cenozoico, periodo que abarca los últimos 66 millones de años del planeta, la vida continuó su desarrollo hasta dar paso a la aparición de nuestra especie humana. En términos generales, el Eón Fanerozoico cubre un periodo muy prolífico en formas de vida, considerando que durante ese eón aparecieron los insectos, las primeras plantas (los helechos), los reptiles (por ejemplo, dinosaurios), los mamíferos, las aves y las plantas (con semillas, flores, frutos). Durante este tiempo también evolucionaron los primates y, como ya se dijo, aparece el *Homo sapiens*.

A pesar de esta gran proliferación de vida, debemos recordar que durante el Fanerozoico se presentaron cinco importantes extinciones masivas que aniquilaron muchas formas de vida. Entre esos eventos de extinción masiva, se destaca la extinción de los dinosaurios, hace 65-66 millones de años, a causa, según las investigaciones, del impacto de un asteroide que formó el cráter de Chicxulub, en la península de Yucatán, en México. También se tiene noticia de la extinción de los grandes anfibios y de las especies terrestres, hace unos 200 millones de años, cuya causa se ha relacionado con extensas erupciones de lava y su consecuente emisión de dióxido de carbono.

Así mismo, se ha registrado la extinción de los trilobites y los insectos, hace unos 252 millones de años, fenómeno que, según estudios, estuvo relacionado con actividad volcánica e impactos de asteroides. Hace unos 360-375 millones de años también se dio la extinción y el desvanecimiento de artrópodos y trilobites, relacionados con el agotamiento del oxígeno en los océanos, por causas atribuidas a volcanes, impactos de asteroides e incluso proliferación de vegetales terrestres. Igualmente, se supo de la extinción y el desvanecimiento de esponjas, peces sin mandíbula y moluscos, entre otros, hace 445 millones de años, debido a una intensa glaciación desarrollada en esa época. Como se observa, el Eón Fanerozoico es el periodo que tiene más registro geológico en el planeta y es el mejor estudiado, en comparación con los otros eones.

Podemos concluir que nuestra especie, el *Homo sapiens*, ocupa un pequeño punto en el gran árbol filogenético de la vida. Somos una especie relativamente nueva en la convulsionada fiesta de la biota terrestre. Nuestros intrépidos ancestros y parientes biológicos lejanos permanecieron muchos millones de años bajo el agua, luego colonizaron tierra firme y, posteriormente, algunos de ellos revolotearon por el cielo. Ahora nosotros, la especie más reciente invitada a la gran fiesta de la vida, hemos sido capaces de surcar el espacio exterior más próximo, es decir, hemos hecho presencia, de alguna manera, en nuestro espacio planetario, e incluso ya tenemos puestos nuestros ojos en el espacio exterior más distante. Esa es la naturaleza de nuestra especie; por eso muy seguramente dentro de algún

tiempo también seremos capaces de extender nuestra presencia a otros planetas. La razón de esa esperada y anhelada expansión del hombre por el espacio es claramente justificable: nuestro minúsculo planeta no puede seguir siendo el único nido para poner todas las semillas de vida cosechadas durante millones de años de evolución; esto es un gran riesgo.

A nuestra especie le espera la conquista de un universo ignoto, un universo donde seguramente encontraremos una biota parecida o diferente de nuestra biota terrestre. Ahora en nuestras manos está el futuro de nuestro planeta, nuestro futuro y el de todos esos organismos con los que convivimos en Gaya (madre tierra), con los que compartimos una historia de supervivencia de algunos millardos de años. Por eso, sería deplorable que los seres humanos perdamos esa perspectiva y esa suprema tarea que nos corresponde apoyar diariamente como especie dotada de razón. Nunca debemos dejar que los enfermizos egos personales y las banalidades de nuestra sociedad eclipsen esa tarea suprema que tenemos como especie.



Paso del río Chicamocha a la altura del municipio de Aratoca.





Paisaje del páramo de Listará, en el municipio de Cerrito.

## Referencias bibliográficas

Carlson, R. (2017). Earth's building blocks. *Nature*, 541, 468-479.

Ferris, J. P. (2005). Mineral Catalysis and Prebiotic Synthesis: Montmorillonite-Catalyzed Formation of RNA. *Elements*, 1(3), 145-149.

Hazen, R. M.; Ferry, J. M. (2010). Mineral Evolution: Mineralogy in the Fourth Dimension. *Elements*, 6(1), 9-12.

Heck, P.; Greer, J.; Kööp, L.; Trappitsch, R.; Gyngard, F.; Busemann, H.... Wieler, R. Lifetimes of interstellar dust

from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 1884-1889.

Javoy, M.; Kaminski, E.; Guyot, F.; Andraut, D.; Sanloup, C.; Moreira, M.... Jaupart, C. (2010). The chemical composition of the Earth: Enstatite chondrite models. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(3-4), 259-268.

Labrosse, S.; Poirier, J.-P. y Le Mouél, J.-L. (2001). The age of the inner core. *Earth and Planetary Science Letters*, 190(3-4), 111-123.



Putnis, Ch. V. y Ruiz-Agudo, E. (2013). The Mineral-Water interface: Where Minerals React with the Environment. *Elements*, 9(3), 117-182.

Sowerby, S. J.; Edelwirth, M. y Heckl, W. M. (1998). Self-assembly at the prebiotic solid-liquid interface: structure of self-assembled monolayers of adenine and guanine bases formed on inorganic surfaces. *Journal of Physical Chemistry B*, 102(30), 5914-5922.

Wilson, R. W.; Houseman, G. A.; McCaffrey, K. J. W.; Doré, A. G. y Buitter, S. J. H. (2019). Fifty Years of the Wilson Cycle Concept in Plate Tectonics. *Geological Society London Special Publications*, 470, 1-17.

Zheng, Y. F. y Zhao, G. (2020). Two styles of plate tectonic in Earth's history. *Science Bulletin*, 65(4), 329-334.



Nevado del Ruiz, en el departamento de Caldas.



# 2 Geología de Colombia y del departamento de Santander

**E**ste territorio, desde hace un par de siglos, es conocido con el nombre que, si la historia del mundo no fuera una cadena de absurdas casualidades, debería llevar toda América: Colombia.

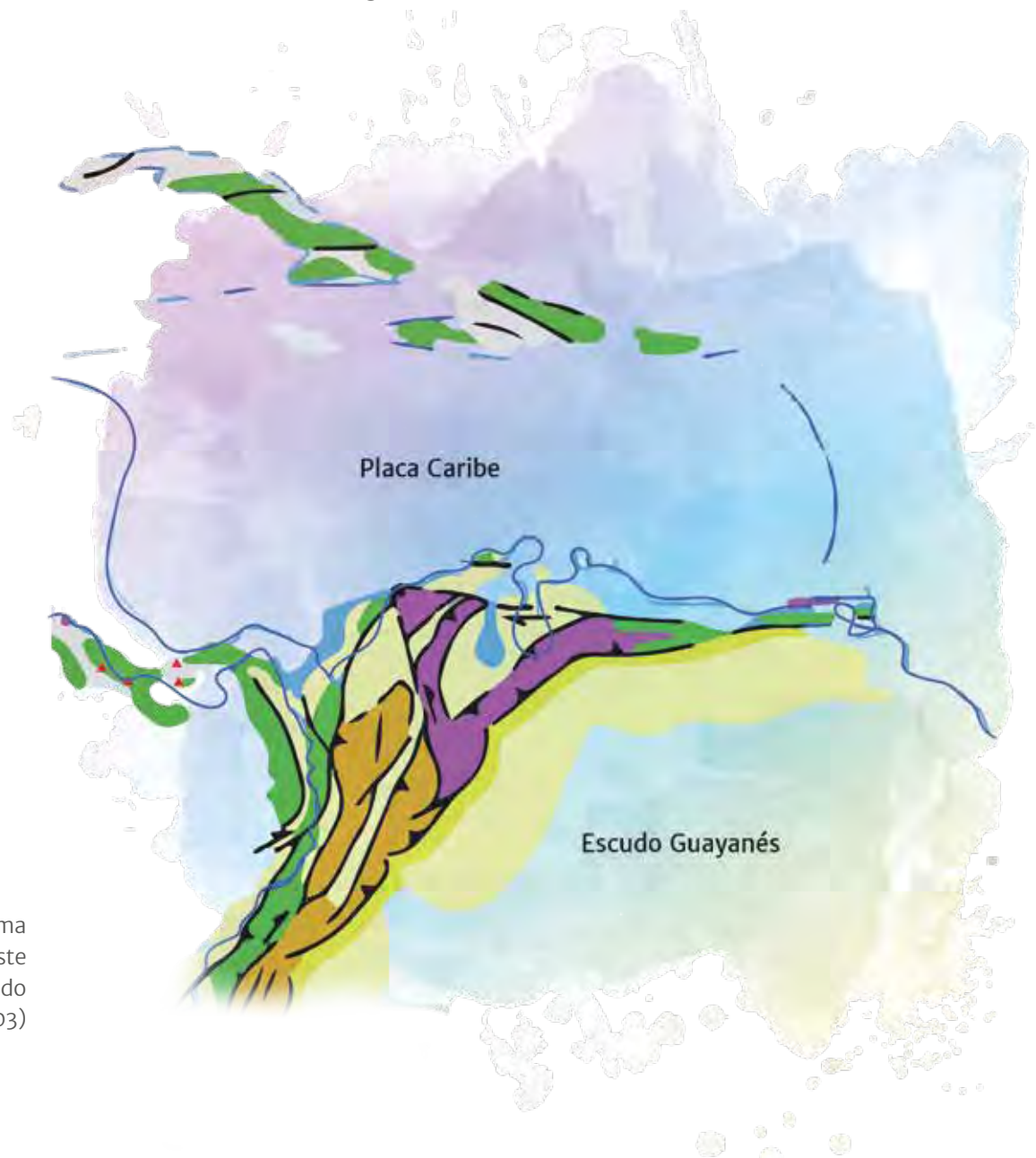
Héctor Abad Faciolince, *Angosta*

## Generalidades de la evolución geológica de Colombia

La Tierra es un planeta dinámico, el único del sistema solar que posee una tectónica de placas activa, teoría que explica la forma en que está estructurada la capa externa de la esfera terrestre, es decir, de la litósfera. En su proceso de tectónica de placas, esta capa de la Tierra da origen al relieve global actual del que hace parte el territorio colombiano (véase la figura 24).

El relieve actual de nuestro país es el resultado de la interacción de las placas, fragmentos de suelo de consistencia rígida que se mueven sobre la astenósfera, una zona relativamente plástica del manto superior.

Cuando se observa el mapa topográfico de Colombia, es evidente que hay un contraste entre la región oriental, más conocida como la región de los Llanos Orientales, y las regiones central y occidental, que conforman la



**Figura 24.** Esquema tectónico del noroeste de Suramérica. Modificado de Cediel *et al.* (2003)

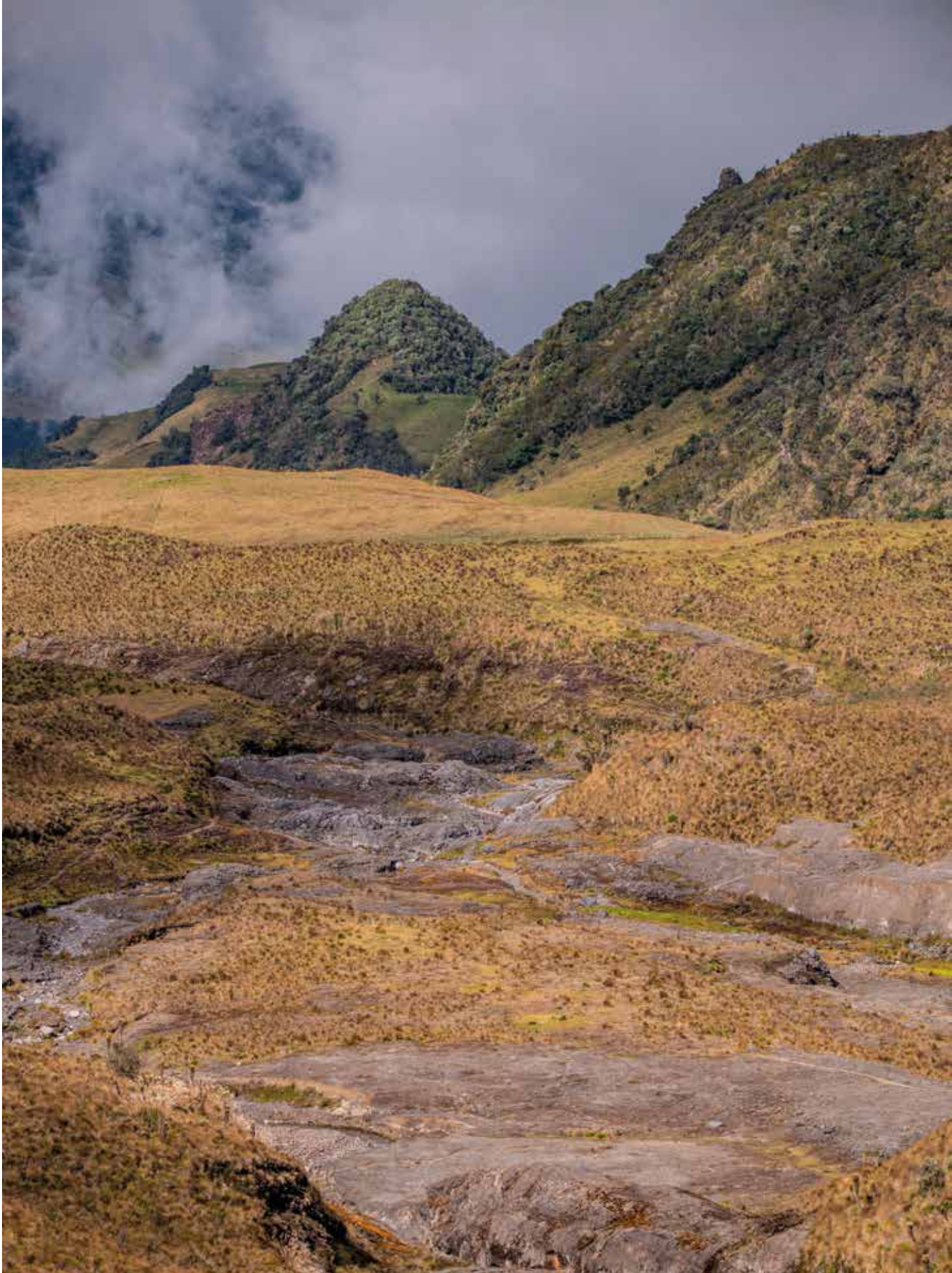


**Figura 25.** Mapa de Colombia con las principales regiones tectónicas. 1) región Oriental (Llanos Orientales); 2) región Central (cordilleras Oriental y Central); 3) región Occidental (Cordillera Occidental y serranía del Baudó). Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), Sistema de Falla de Romeral (SFR), Sistema de Falla del Borde Llanero (SFBL). Modificado de Barrero *et al.* (2007)

región de los Andes. En la primera predomina un relieve plano, mientras que en la segunda se destaca un relieve abrupto, conformado por las cordilleras Occidental, Central y Oriental (véase la figura 25).

La diferencia entre estas dos regiones no radica únicamente en el relieve, sino también en la edad, la litología, la tectónica y la historia geológica de las rocas que las conforman.

En la región oriental se encuentran las rocas más antiguas del país, con edades entre 1780 y 1800 millones de años, formadas en el Precámbrico, la etapa más antigua y duradera de la historia de la Tierra. Esta región



Formaciones geológicas en las estribaciones del Nevado del Ruiz.

es la primera porción del territorio nacional surgida como parte de la periferia occidental de lo que hoy constituye el núcleo más antiguo de los continentes actuales: el cratón de Amazonia (Cediel *et al.*, 1919). Además, está compuesta por rocas metamórficas e ígneas que se formaron durante la orogenia Transamazónica.

Las orogenias son eventos formadores de montañas que ocurren cuando convergen dos placas o dos cratones, las masas más antiguas de la parte continental de una placa. El registro estratigráfico de esta región se completa con una secuencia de rocas sedimentarias del Paleozoico, el Mesozoico y el Cenozoico, divisiones geológicas de la escala temporal que comprenden el periodo desde 541 millones de años atrás hasta el presente (véase la figura 23 del capítulo 1).

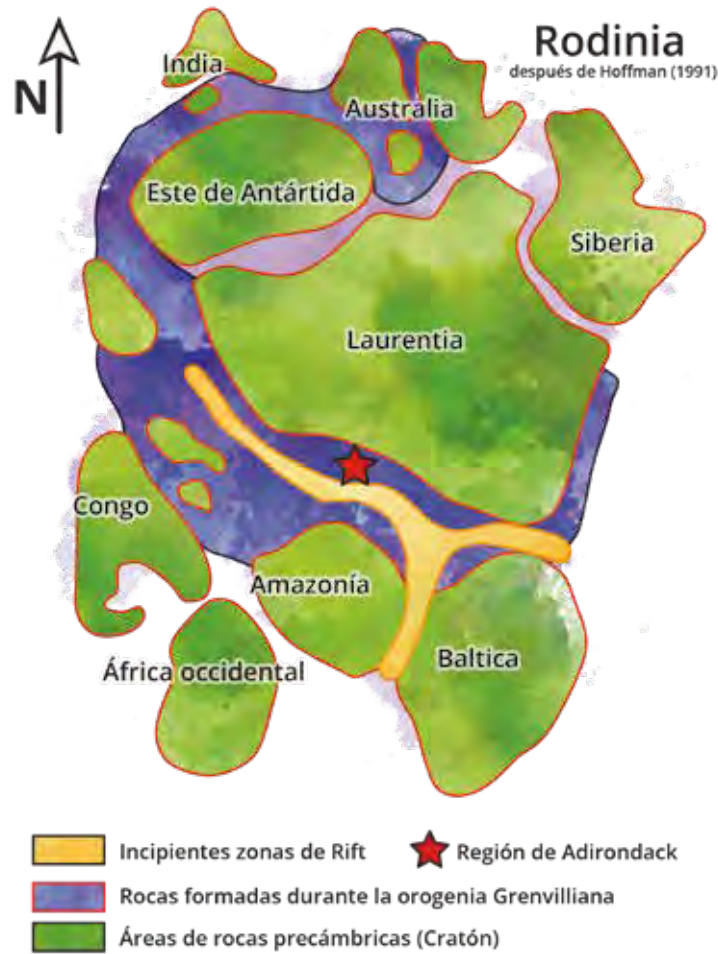
En el aspecto tectónico, se considera que la región oriental es estable, es decir, que no ha sido afectada por deformaciones estructurales desde el Paleozoico inferior.

Por el contrario, la región de los Andes, conformada por las subregiones central y occidental, es montañosa, más joven y tectónicamente inestable. Esta región ha sido afectada por sucesivos eventos orogénicos que han plegado, fallado y levantado bloques de roca hasta modelar el relieve actual.

El basamento de la región de los Andes está constituido por rocas metamórficas (anfíbolitas y granulitas) que afloran como bloques aislados en la Cordillera Oriental (Macizos de Garzón y Santander), la Cordillera Central (serranía de San Lucas), la Sierra Nevada de Santa Marta y la Alta Guajira. Este cinturón se formó como resultado de la convergencia continental del cratón de Laurentia (Norteamérica) y el cratón de Amazonia (véase la figura 26), evento global conocido como orogenia Grenvilliana, mediante la cual se consolidó el supercontinente Rodinia (Hoffman, 1991). Este gran evento abarcó desde los 1200 millones de años hasta los 900 millones de años atrás, y afectó la periferia noroccidental del cratón Amazónico, con lo cual el territorio colombiano fue creciendo hacia el occidente.

En el Paleozoico temprano, hace 541-419 millones de años (véase la figura 23), un nuevo evento, denominado orogenia Caledoniana, a escala planetaria, y Famatiniana-Quetame, a escala suramericana y colombiana, metamorfoseó rocas sedimentarias y volcánicas básicas marinas. Estas rocas se habían formado en una cuenca oceánica generada en el proceso de fragmentación del supercontinente Rodinia, ocurrida a finales del Precámbrico, con la consecuencia de la formación de esquistos, filitas y ortogneises, variedades de rocas metamórficas que hoy hacen parte de los Macizos de Quetame, Floresta y Santander, en la Cordillera Oriental.





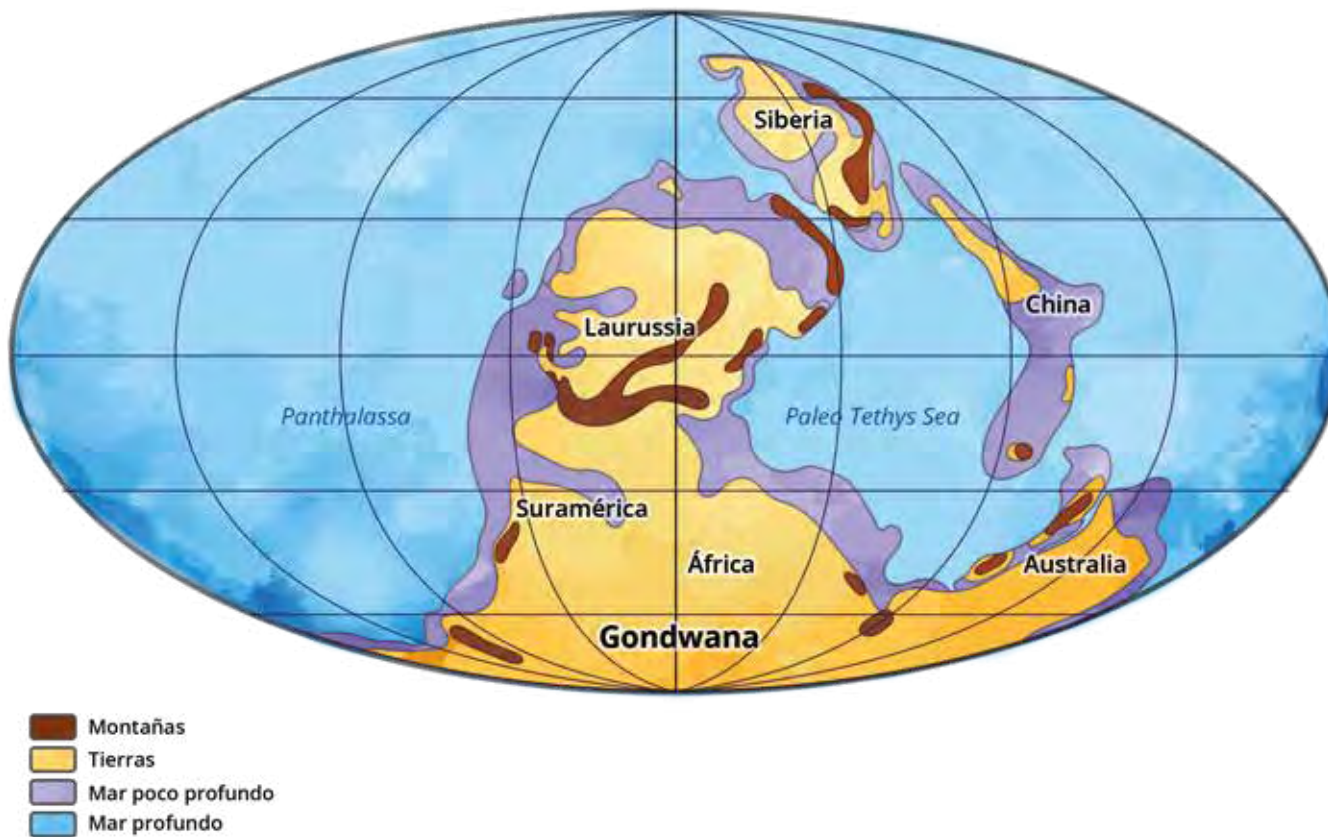
**Figura 26.** Esquema ilustrativo de la localización del territorio colombiano en el marco de la orogenia Grenvilliana (formada hace unos 1200 a 900 Millones de años) formada por la colisión continental entre los cratones de Laurentia y Amazonía. Modificado de Hoffman (1991).

Durante el Paleozoico tardío (hace 323 millones de años) y comienzos del Triásico (hace 252-240 millones de años), el territorio colombiano continuó creciendo hacia el occidente. Esta expansión fue el resultado de la colisión entre el sureste del cratón de Laurentia, la actual Norteamérica, y el noroccidente de la periferia de Gondwana, que hoy corresponde a Suramérica, África, Australia y Antártica juntos (véase la figura 27). Así, la nueva porción de territorio quedó constituida por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias.

Pangea, que significa ‘todas las tierras’, fue el nombre que se le dio al nuevo supercontinente, que, luego de permanecer unido durante un tiempo, empezó a desmembrarse. Esto ocurrió a finales del Triásico y a comienzos del Jurásico (hace 220-190 millones de años); para entonces Colombia ya ocupaba la esquina noroccidental de Suramérica (véase la figura 28).



Valle de la quebrada La Honda, en el municipio de California.



**Figura 27.** Esquema ilustrativo de la configuración de Gondwana y Laurentia (Paleozoico tardío). Modificado de Scotese y Golonka (1992).

Como consecuencia de este proceso de dispersión del supercontinente, empezó a formarse en el norte un mar que, posteriormente, se transformó en el océano Atlántico actual. Mientras esto sucedía en el norte, en el occidente funcionaba una zona de subducción, es decir, un hundimiento de una placa oceánica debajo de una placa continental. Este deslizamiento generó un arco magmático y formó cuencas, áreas hundidas donde se acumulan sedimentos, que se rellenaron con materiales de origen predominantemente volcánico.

Ya en el Cretácico, división más joven de la era Mesozoica (hace 145–66 millones de años), los continentes continuaron separándose, mientras que en el país empezó a formarse una cuenca marina en el centro del territorio, en lo que hoy es la sabana de Bogotá, y continuó ensanchándose hacia el occidente y el oriente, y extendiéndose rápidamente hacia el norte y el sur hasta latitudes como las del Perijá y el Putumayo.

Los sedimentos acumulados fueron principalmente lodos calcáreos con abundante materia orgánica, que dieron origen a los yacimientos de hidrocarburos actuales. A finales del periodo Cretácico se produjo el

levantamiento de la Cordillera Central (véase la figura 25), como resultado del inicio de la colisión de la placa Farallones con la placa Suramericana (Villamil, 1999; Bayona, 2012). Al tiempo que esto sucedía en el centro oriente del territorio, al occidente ocurría una zona de subducción activa, que transportó rocas de origen oceánico, como basaltos, gabros y diabasas, y las “comprimió” contra la periferia continental que continuaba creciendo hacia el occidente.

En el Paleógeno, división más antigua de la era Cenozoica (hace 66-23 millones de años), el mar interior del Cretácico continuó su “somerización”; esto produjo un cambio en las condiciones bajo las cuales se depositaron los sedimentos, que pasaron del ambiente marino a uno transicional<sup>1</sup> y luego a otro continental.

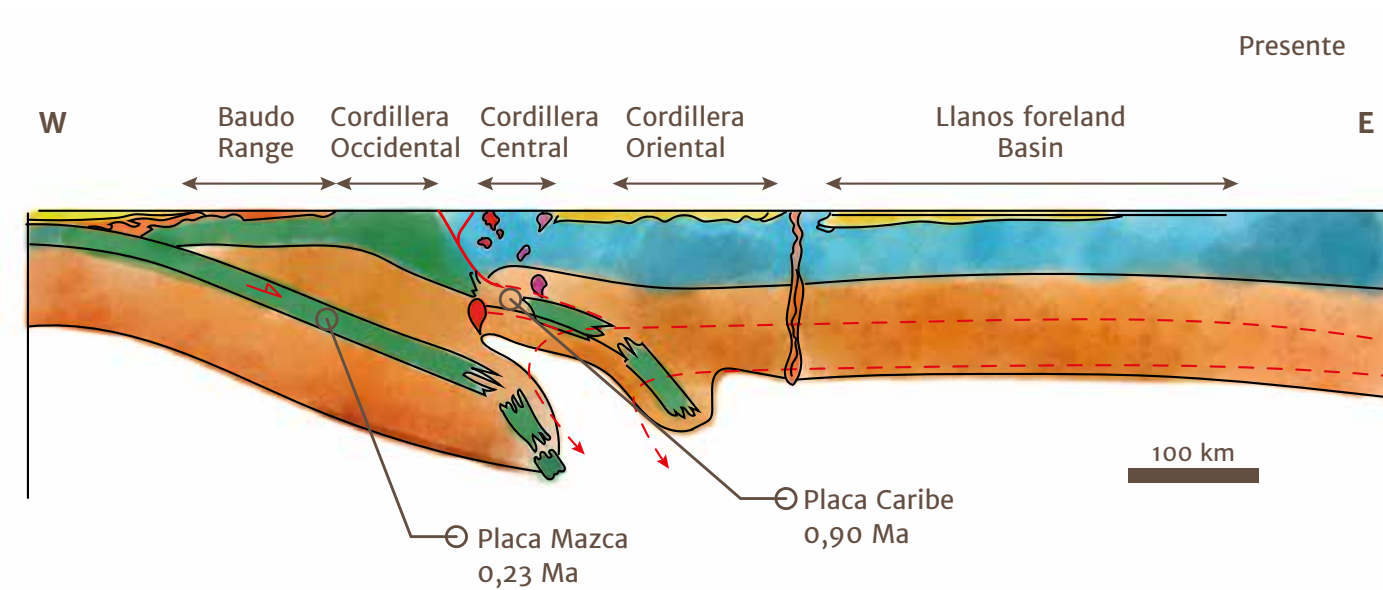
Durante el Neógeno, la división más joven de la era Cenozoica (hace 23 millones de años hasta el presente), el empuje de la placa Caribe en su desplazamiento hacia el nororiente da origen al levantamiento de las cordilleras Occidental y Oriental; este evento se conoce como orogenia Andina.



**Figura 28.** Esquema ilustrativo de la configuración del antiguo supercontinente Pangea

<sup>1</sup> Un ambiente transicional es un ambiente sedimentario que fluctúa entre un ambiente marino y un ambiente continental.

En la actualidad, el territorio colombiano se encuentra localizado en la zona noroccidental de la placa Suramericana, en interacción constante con las placas Nazca, Caribe, Cocos y otras regiones menores. La condición actual de convergencia, especialmente entre las placas Nazca, Suramericana y Caribe, es la responsable de la intensidad de los procesos tectónicos activos actuales, como la subducción, el crecimiento de las cordilleras, las cuencas y las cadenas volcánicas y la intensa actividad sísmica (véase la figura 29).



**Figura 29.** Corte geológico occidente-orientado de la región Andina y la región de los Llanos Orientales de Colombia. Modificado de Cediel *et al.* (2018) y Bayona *et al.* (2012)

## Referencias bibliográficas

Bayona, G.; Cardona, A.; Jaramillo, C.; Mora, A.; Montes, C.; Valencia, V.; Ayala, C.; Montenegro, O. e Ibáñez-Mejía, M. (2012). Early Paleogene magmatism in the northern Andes: Insights on the effects of Oceanic Plateau–continent convergence. *Earth and Planetary Science Letters*, 331–332, 97–111.

Barrero, D.; Pardo, A.; Vargas, C. y Martínez, J. (2007). *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*. ANH.

Cediel *et al.* 2011. *Regional Geology of Colombia*. Vol. 1.1. ANH

Cediel F. y Shaw R. P. (2019). *Geology and Tectonics of Northwestern of South America*. Springer International Publishing.

Hoffman, P. (1991). Did the birth of North America turn Gondwana inside out? *Science*, 252, 1409–1412.

Scotese, C.R., and Golonka, J. 1992. Paleogeographic Atlas, PALEOMAP Progress Report 20–0692, Department of Geology, University of Texas at Arlington, 34 pp.

Villamil, T. (1999). Campanian–Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, 153, 239–275.



Interior de la cueva del Oro, en el municipio de El Peñón.



Paisaje del páramo de Santurbán, en jurisdicción del municipio de Guaca.



Laguna Los Pajaritos en el páramo de Listará, municipio de Cerrito.



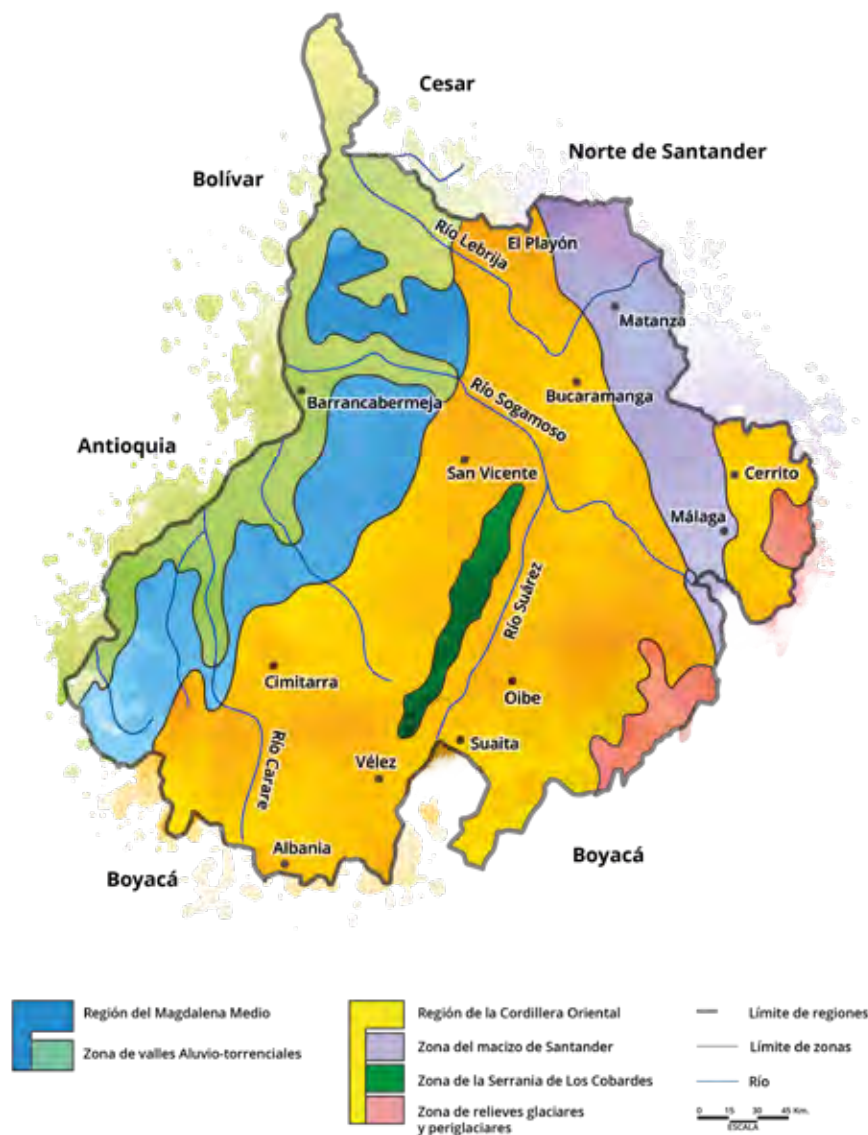


## Generalidades de la evolución geológica de Santander

A lo lejos los montes ondulaban su piel violeta.

Pedro Gómez Valderrama, *La otra raya del tigre*

Santander es un departamento predominantemente montañoso. La mayor parte de su territorio está ocupado por la Cordillera Oriental, en donde se encuentra el Macizo de Santander. El territorio restante está dominado por la cuenca actual del Valle Medio del Magdalena (véase la figura 30).



**Figura 30.** Regiones fisiográficas del departamento de Santander. Modificado de Royero y Clavijo (2001)

El relieve santandereano ha sido moldeado por numerosos eventos geológicos que se iniciaron en el Proterozoico (véase la figura 6 del capítulo 1) y que continúan en la actualidad.

A mediados del Proterozoico y comienzos del Neoproterozoico (hace 1200–900 millones de años), la porción más antigua del territorio del departamento de Santander hacía parte de la periferia occidental del cratón Amazónico, donde, junto con otras regiones similares (el Macizo de Garzón, el Macizo de San Lucas y la Sierra Nevada de Santa Marta), formaba la nueva margen del cratón: el cinturón Grenvilliano. Este accidente geográfico era un extenso sistema montañoso que se había formado como consecuencia de la orogenia Grenvilliana (Cediell, 2003). Es por ello que, en ese entonces, el Macizo de Santander estaba constituido por gneises, rocas metamórficas de alto grado.

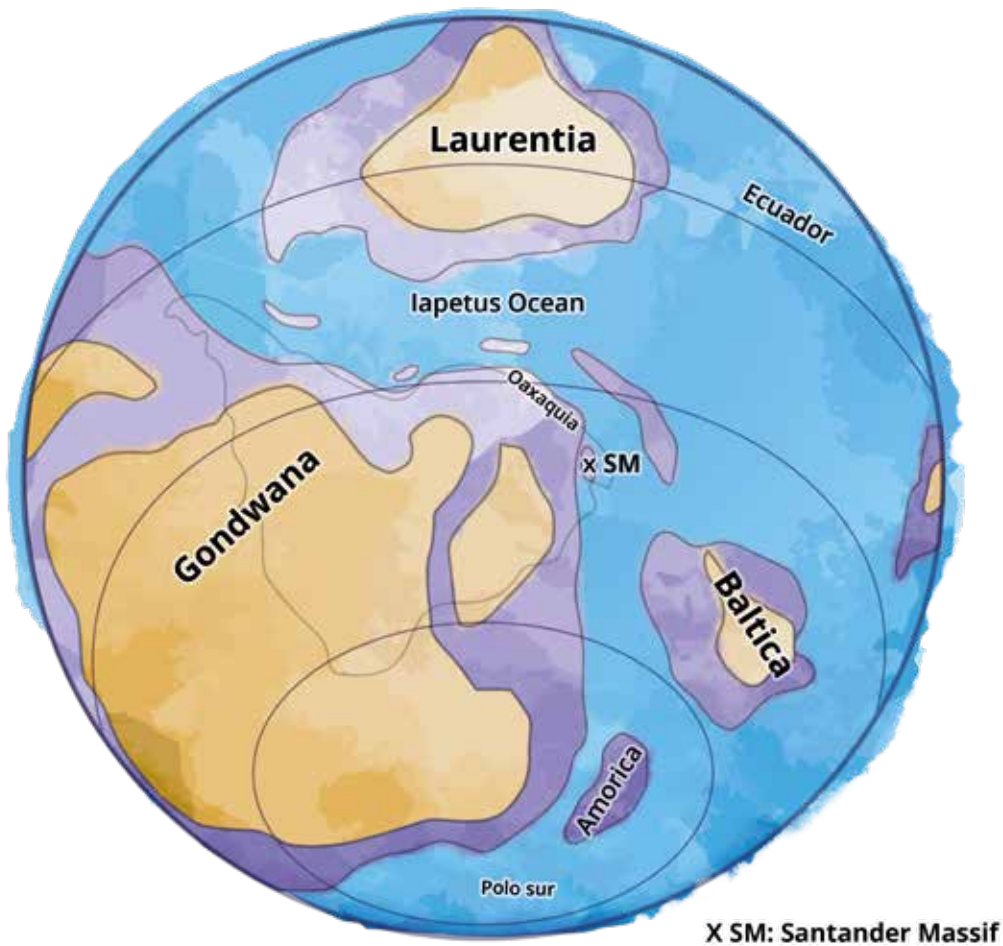


Formaciones montañosas en el páramo de Almorzadero.



Páramo de Listará, en jurisdicción del municipio de Cerrito.

A comienzos del Paleozoico, el Macizo de Santander hacía parte de la paleomargen nororiental del supercontinente Gondwana, que funcionaba como una zona de subducción entre el océano Iapetus, un antiguo océano que existió hace 600–400 millones de años, y la periferia continental de Gondwana (véase la figura 31). Este proceso dio origen a la orogenia Famatiniana–Quetame, evento generador de montañas que transformó los materiales volcanoclásticos de la cuenca oceánica en los Esquistos de Silgará y los ígneos del arco magmático en el Ortogneis de Pamplona (Mantilla *et al.*, 2016; García *et al.*, 2017). Este evento de deformación, que produjo el sistema montañoso del Famatiniano–Quetame, soldó estos últimos materiales referidos a la antigua periferia de Gondwana, para dar origen al basamento del territorio santandereano, “base” más antigua conformada por rocas metamórficas e ígneas.



**Figura 31.** Ubicación paleogeográfica del Macizo de Santander en el Ordovícico. Modificado de Mantilla *et al.* (2012)

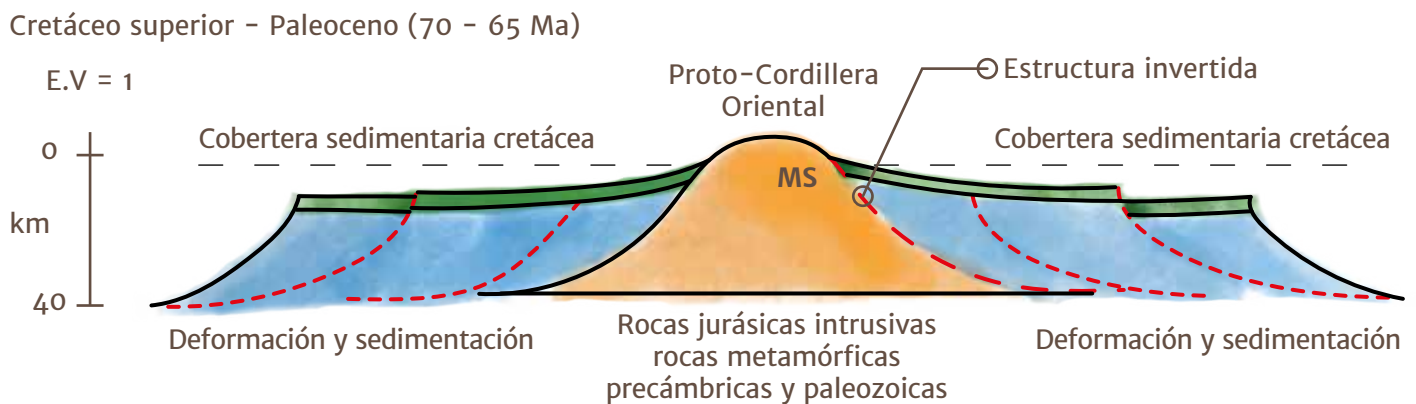
Como resultado de estos eventos, se formó un paleorrelieve, arrasado posteriormente de manera progresiva por la erosión, y, en su lugar, se creó una amplia planicie sobre la cual avanzaron las aguas de un nuevo mar (Rheico), de modo que allí se depositaron sedimentos arenosos, lodosos y calcáreos. Esto ocurrió en un periodo que se extendió desde el Devónico hasta el Pérmico (hace 419-252 millones de años), en el marco de sucesivos avances y retrocesos del mar.

A finales del Triásico y comienzos del Jurásico, se inició la fracturación del supercontinente Pangea en un marco tectónico distensivo. Así, en el entonces territorio santandereano empezó a formarse una cuenca estrecha y alargada, que se rellenó con sedimentos producto de la erosión del paleorrelieve Proterozoico-Paleozoico. Este

evento sedimentario continental y transicional estuvo acompañado por un incipiente volcanismo andesítico, riolítico y basáltico, que dio origen a las hoy formaciones Bocas y Jordán. De manera simultánea a estos eventos, tuvo lugar el emplazamiento de cuerpos ígneos plutónicos de granitoides (Clavijo *et al.*, 2008). A finales del Jurásico, en esta cuenca ensanchada se deposita la potente secuencia fluvial de Girón.

En el Cretácico temprano, la sedimentación continental da paso, de manera gradual, a la transgresión marina, que inunda lo que hoy es la cuenca del río Magdalena (véase la figura 30). De esta manera se depositó una espesa secuencia de carbonatos, lodos calcáreos y arenas, que dieron origen a las formaciones cretácicas actuales en la cuenca del Valle Medio del Magdalena.

En el Cretácico tardío y el Paleógeno temprano (hace 72-62 millones de años), se inicia el retiro del mar intracontinental. En este periodo termina el evento distensivo y comienza un proceso de inversión de esfuerzos, que da inicio a un evento compresivo, como resultado de la convergencia oblicua de la placa Caribe con la periferia noroccidental de Suramérica. En esta época inicia el proceso de exhumación del Macizo de Santander, fenómeno que continúa en el presente. Durante este periodo, la erosión remueve gran parte de la megasecuencia cretácica, adosada a la periferia del macizo, y aporta el material que formará las actuales unidades paleógenas y neógenas (división más joven de la era Cenozoica; véanse las figuras 32 y 33).

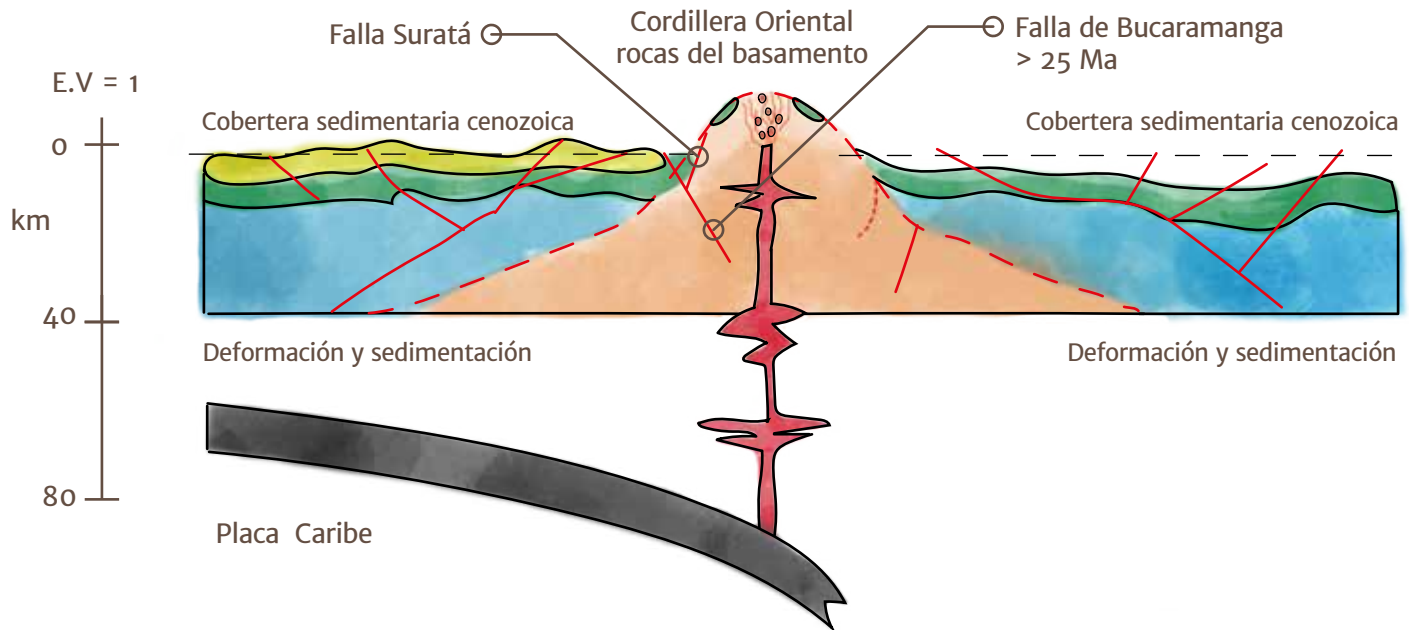


**Figura 32.** Inicio del proceso de exhumación del Macizo de Santander. Tomado y modificado de Amaya (2016)

A mediados del Mioceno (hace 13 millones de años) se inicia el levantamiento generalizado de la Cordillera Oriental santandereana, como consecuencia de la orogenia Andina. En el Mioceno tardío (hace 8 millones de años), se produce una fase de compresión más intensa que hace que las unidades sedimentarias de la cordillera sean afectadas por plegamiento, fallamiento y magmatismo félsico, que son magmas ricos en minerales cuarzosos y feldespáticos (véase la figura 33).

Esta dinámica andina referida sigue afectando actualmente al territorio santandereano, y se manifiesta —entre otros aspectos— en la actividad del nido sísmico de Bucaramanga, que hace parte de una de las regiones sísmicas más activas del mundo.

Mioceno medio - Mioceno tardío (14 - 8 Ma)



**Figura 33.** Sección transversal del Macizo de Santander y unidades sedimentarias del Mesozoico y del Cenozoico. Tomado y modificado de Amaya (2016)

## Referencias bibliográficas

Amaya, S. (2016). *Termocronología y geocronología del basamento del Macizo de Santander, departamento de Santander* (tesis de doctorado). Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.

Clavijo, J.; Mantilla, L.; Pinto, J.; Bernal, L. y Pérez, A. (2008). Evolución geológica de la serranía de San Lucas, norte del Valle Medio del Magdalena y noroeste de la Cordillera Oriental. *Boletín de Geología*, 30(1), 45-62.

García-Ramírez, C.; Casadiegos-Agudelo, L. y Castellanos-Meléndez, M. P. (2019). Petrology and geochemistry of the Silgará Schists in the Silos area, Santander Massif, Colombia. *DYNA*, 86(209), 271-280.

Mantilla, Figueroa, L. C.; Bissig, T.; Cottle, J. M. y Hart, C. (2012). Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). *Journal of South American Earth Sciences*, 38, 1-12.

Mantilla-Figueroa, L.; García-Ramírez, C. y Valencia, V. (2016). Nuevas evidencias que soportan la escisión de la Formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 40(155), 320-336.

Royero, J. y Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado de Santander. Memoria Explicativa. Ingeominas.



Paso del río Chicamocha en cercanías del municipio de Cepitá.



Formaciones que nos remiten a la historia de las glaciaciones en las montañas cercanas al municipio de Cerrito.

# 3 Paisajes geológicos de Santander

**S**e corre el telón y comienza la función. El paisaje mismo brinda la escenografía perfecta para contar una historia de tiempos sin tiempo, una historia que se convierte en el espejo donde nos miramos en nuestro presente, pues se manifiesta en cada risco, en cada palabra, en cada ladera, en cada valle y en cada colina: es la historia del paisaje geológico de un territorio llamado Santander.





Laguna de Las Calles, municipio de Vetás.

## Paisajes del Macizo de Santander

### Complejo del páramo de Santurbán

---

El complejo del páramo de Santurbán se ubica en la parte alta de la Cordillera Oriental de Colombia. La fortuna de contar con este ecosistema y su riqueza hídrica es compartida por los departamentos de Santander y Norte de Santander. Desde el punto de vista geológico, los paisajes de páramo son los más exuberantes, pues dan la posibilidad de apreciar distintas formas del relieve, según el tipo de rocas y los afloramientos donde es posible observar de manera directa la roca fresca. Usualmente, en climas tropicales, como los de Colombia, las rocas sufren cambios físicos intensos que descomponen sus propiedades y las van convirtiendo poco a poco en suelo, donde apenas algunos minerales propios de las rocas se mantienen, aunque disgregados, y otros se pierden. Sin embargo, en los páramos, las condiciones climáticas hacen que los perfiles del suelo sean delgados y que podamos disfrutar paisajes rocosos.

Santurbán cuenta con las mayores alturas de un complejo geológico denominado Macizo de Santander, donde se exponen rocas de distintos tipos y edades. Así, hacia el centro y la vertiente occidental del páramo, encontramos las rocas metamórficas e ígneas, donde los paisajes rocosos no son tan continuos, sino que se presentan a modo de lomas. También se encuentran algunas rocas más jóvenes (del Jurásico), que se distinguen en el páramo de Berlín a modo de paisajes alomados y depresiones, así como grandes cuerpos intrusivos (magma solidificada), donde se evidencia la presencia de cristales, especialmente cuarzo y feldespatos, que reciben el nombre genérico de granitoides.



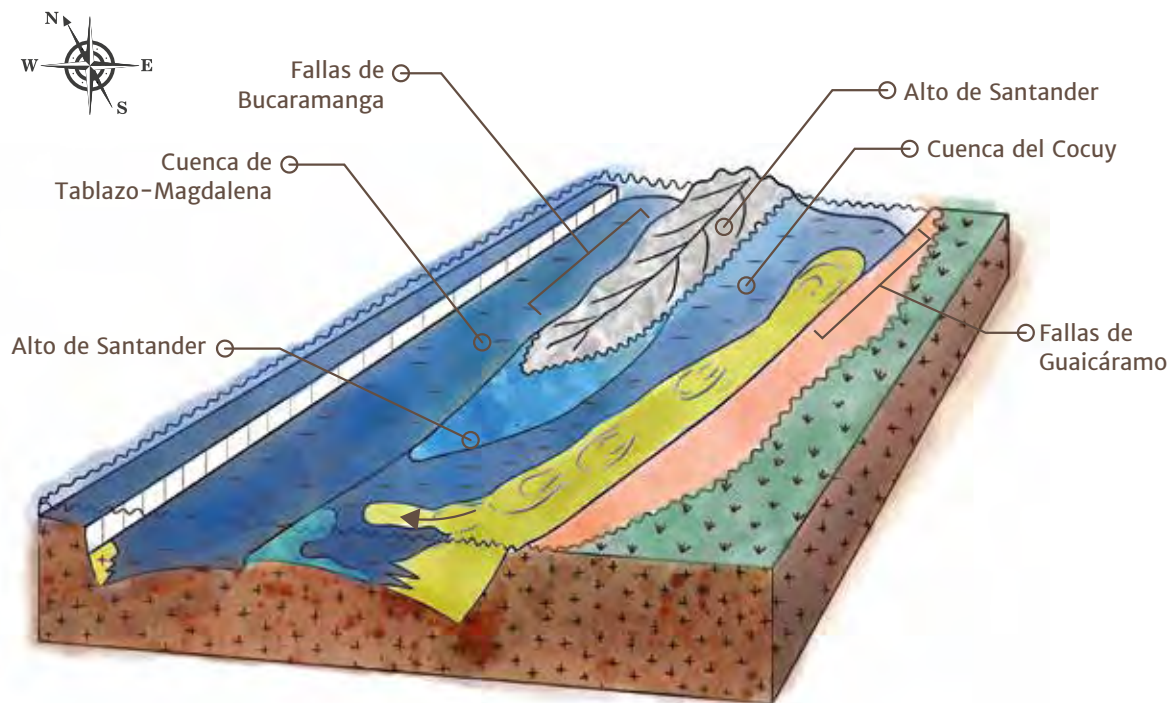


Valles y formaciones geológicas sobre el páramo de Berlín del complejo Santurbán.

Las rocas metamórficas e ígneas pueden considerarse resistentes, pero han sido afectadas por eventos tectónicos que hicieron aparecer el núcleo de la cordillera (basamento) en estos páramos de Santurbán. En alguna época de su historia, estas rocas de basamento fueron erosionadas por ríos, y los sedimentos se acumularon en depresiones formadas a medida que los continentes se separaban durante el periodo Triásico-Jurásico. A través de estos desniveles topográficos ingresó el mar, y durante el Cretácico se conformó una alargada isla denominada Alto de Santander, que se extendía desde el Macizo de Floresta en Boyacá hasta la serranía del Perijá, pasando, por supuesto, por el Macizo de Santander (véase la figura 34). Esta isla separó dos cuencas marinas, la cuenca del Tablazo (hacia el Valle Medio del Magdalena) y la cuenca del Cocuy, donde se acumularon depósitos de lodos, arenas, carbonatos y sales. El nivel del mar fue subiendo, y poco a poco cubrió la isla del Alto de Santander hasta formar un solo mar, y el peso de los nuevos sedimentos fue ejerciendo presión hasta formar las rocas sedimentarias (litificación). A este tipo de rocas también se las puede observar hoy en el páramo, y se distinguen, sobre todo, por su configuración en estratos o capas de rocas de distintas características de composición y textura. En algunos sectores del páramo se encuentran las rocas del Triásico-Jurásico, con bastante materia orgánica, formadas en ambientes continentales cerrados, o las capas rojas características de Santander (Formaciones Jordán y Girón), propias de un ambiente rico en hierro y acumuladas por los ríos antiguos. También podemos observar las rocas marinas del Cretácico, como areniscas formadas en playas, o calizas de ambientes muy someros, o lodolitas que se acumularon en lagunas costeras o ciénagas.



Paisaje del páramo de Listará, en límites con el municipio de San Andrés.



**Figura 34.** Esquema ilustrativo del antiguo Alto de Santander durante el Mesozoico temprano. Tomado y modificado de Coopert *et al.* (1995)

Esta parte de Santander es clave en la geología colombiana, pues permite entender los procesos formadores de las montañas en los que interviene el diálogo entre los fenómenos internos del planeta, relacionados con la tectónica, y los fenómenos externos, gobernados por el clima.

Colombia se ubica en un margen convergente de placas tectónicas, donde Nazca se hunde bajo Suramérica. Este proceso genera vulcanismo y sismos. Los Andes se formaron con un terremoto tras otro; durante varias épocas, quizá los movimientos fueron muy lentos e imperceptibles, pero, tras miles de años, las rocas antiguas alcanzaron importantes alturas. Aunque en Santander no existen volcanes, sí se presentan fallas geológicas activas que, además de ser geoformas que nos indican cómo ha sido su movimiento, también han sido protagonistas de sismos históricos que han dejado víctimas y daños a la infraestructura.

Las fracturas generadas en las rocas a medida que se forma la cordillera provocan que estas se hagan débiles, se fragmenten por efecto de los agentes climáticos (meteorización física) y que, poco a poco, reaccionen



Montañas del páramo de Almorzadero.



Montañas de la zona de El Chiscal, páramo de Santurbán.





con el agua y se descompongan (meteorización química). Estas fracturas y fallas facilitan el tránsito del agua desde los nacimientos en los páramos, y garantizan su infiltración para alimentar los acuíferos (agua subterránea), que, a su vez, pueden manifestarse como manantiales naturales, fuentes de agua pura que benefician a los habitantes de los alrededores. Adicionalmente, se rubraya la importancia de la vegetación propia del páramo (como los frailejones), que, junto a las fracturas mencionadas, es clave en el papel de esponja almacenadora que cumplen estos ecosistemas.

La interacción entre los procesos que levantan cordilleras y los fenómenos climáticos que causan su erosión es el origen de los paisajes en los diferentes páramos del sistema Santurbán. El agua que se precipita y corre por pequeñas quebradas va cortando la montaña y formando valles profundos en forma de “V”, hasta llegar a ríos que buscan su nivel de base en sus desembocaduras, pero, mientras tanto, provocan una fuerte erosión en las laderas de la montaña y fenómenos de movimientos en masa, como deslizamientos y flujos. Esto es lo que caracteriza a la mayor parte de estos páramos y vertientes.

No obstante, el páramo de Berlín se presenta en un altiplano donde predomina un paisaje de colinas, lomas y cerros, y se observa la roca fresca y fracturada. Allí abundan las rocas ígneas cristalinas, en las cuales, si bien se ha formado suelo por la presencia de minerales que fácilmente producen arcillas, como los feldespatos, también otros factores (como el viento) han provocado que este suelo sea delgado, o que no exista. Este es un tipo de denudación climática en que los fuertes cambios de temperatura hacen que la roca se rompa más

El saber y la experticia del geólogo le permiten leer cada fragmento de roca extraído de la gran enciclopedia litográfica del paisaje.





La observación directa de la conformación y la estructura de la roca permite definir aspectos como el tiempo y la presencia de metales en su composición.



fácilmente; lo mismo ocasiona el agua que en el día se infiltra en las fracturas y en la noche se convierte en hielo que fracciona la roca por el cambio de volumen. El viento que golpea las rocas también se lleva los fragmentos más pequeños y la arcilla que el agua alcanza a producir, y, de esa manera, desnuda la roca fresca y al mismo tiempo el corazón de la cordillera. En algunos sitios del páramo se pueden observar esferas de roca fresca rodeadas de roca descompuesta y blanda, formadas por la denominada meteorización esferoidal o en cebolla.

Como se había comentado anteriormente, a las alturas de estos páramos, uno de los principales factores de denudación es el hielo, que en épocas glaciales limó la roca y arrastró el material suelto para acumularlo en morrenas. Hoy vemos pruebas de la existencia de glaciares (masas de hielo) en los valles en forma de “U”, en los depósitos de morrenas o en las acumulaciones

combinadas (fluvio-glaciares) y en lagunas que se formaron especialmente en hondonadas modeladas por el hielo (circos glaciares).

Actualmente, a lo largo de estos valles glaciares se han instalado pequeñas corrientes que fluyen de manera errante y que conforman curvas o meandros (debido a la baja pendiente del terreno) mientras van erosionando la roca del lecho. En su trazado han ensanchado su zona de tránsito conformando llanuras aluviales, y cuando tienen suficiente material para acumular constituyen pequeñas terrazas, espectaculares por la inaudita altura en la que se forman, ya que estas son más comunes en zonas planas y bajas, donde los ríos tienen suficiente espacio y material de acumulación. De manera general, a estas acumulaciones se las denomina depósitos cuaternarios, debido a su formación reciente, pero responden a distintos procesos y presentan variedad de geoformas.

La piqueta o pico de geólogo es una herramienta fundamental para romper debidamente las rocas y encontrar la información necesaria para los estudios correspondientes.



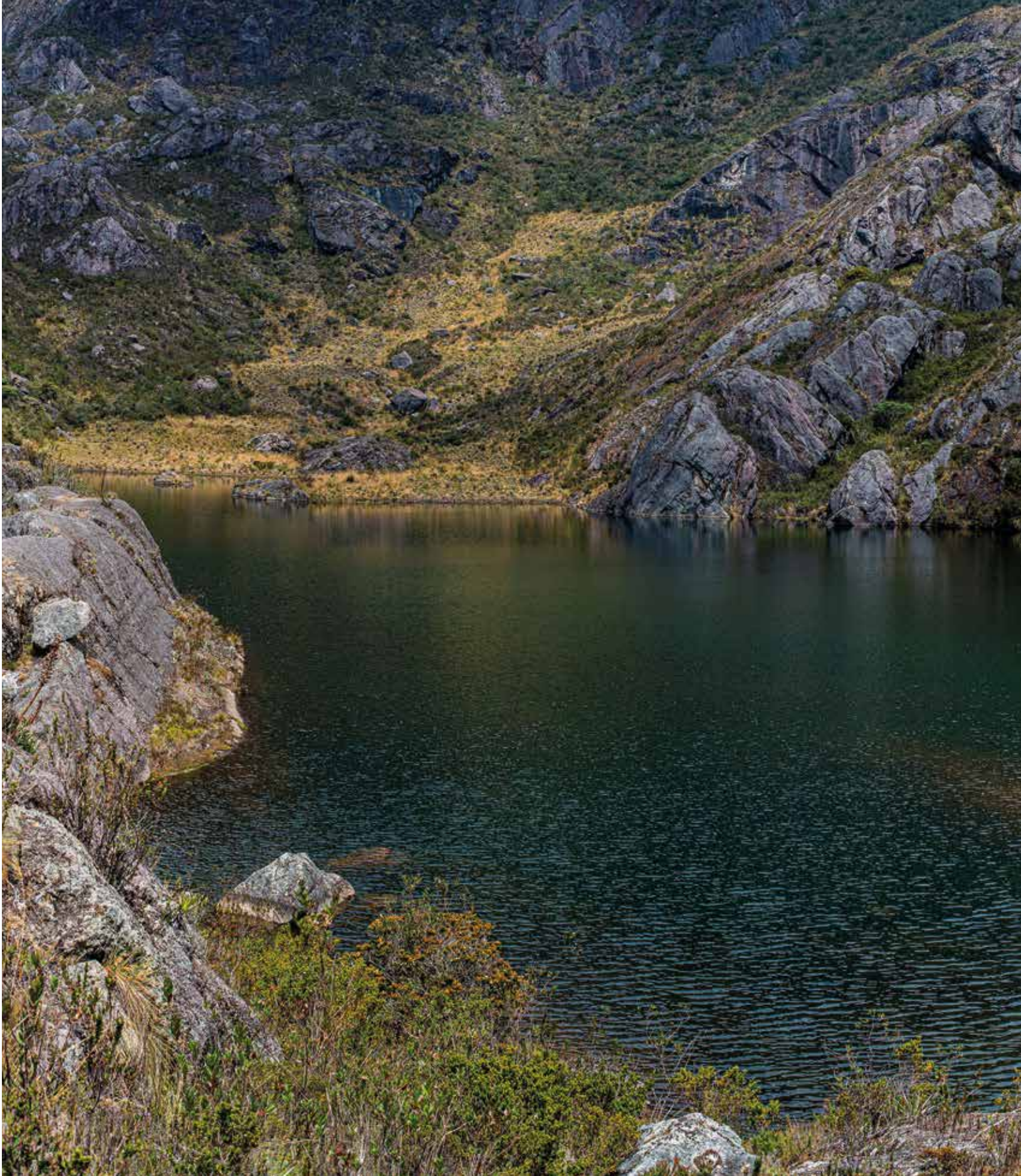
La otra forma de apreciar la radiografía de este paisaje es analizando el resultado de las fallas geológicas (denudación tectónica), y es precisamente esa lucha de procesos contrarios, los endógenos de tipo tectónico y los exógenos de tipo climático (causa de la erosión), los que provocan la exhumación de las rocas antiguas en zonas de los Andes, como en el caso de este majestuoso complejo del páramo de Santurbán.

Las rocas sedimentarias han sido talladas en notorios escarpes, pendientes y lajas, en el caso de areniscas resistentes a la erosión, o en valles suavemente ondulados, en el caso de lodolitas. Las calizas también se muestran en escarpes y laderas de fuertes pendientes, pero

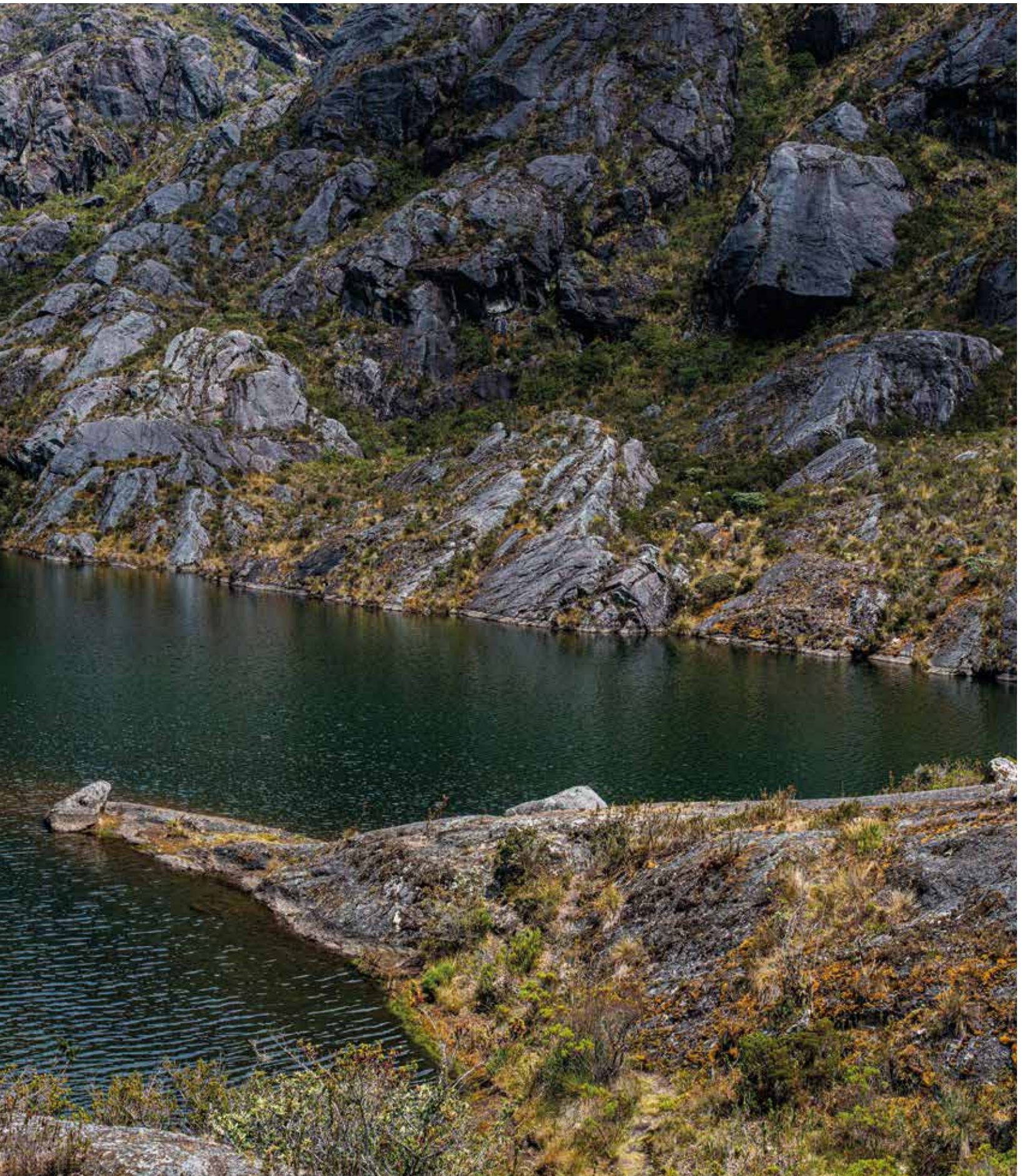
con un paisaje adicional y llamativo, que en la superficie se distingue por hundimientos del terreno en forma circular o elíptica (dolinas), y en la profundidad guarda cuevas y grutas; esto se debe a la disolución de las rocas carbonatadas que reaccionan ante la infiltración del agua por las fracturas.

Las bonitas geoformas de estos paisajes kársticos<sup>2</sup> se observan a distintas escalas, desde corredores por donde es posible caminar hasta superficies en rocas que se formaron por las gotas de lluvia o por su escurrimiento, o por su disolución en delgadas zonas de fracturas.

<sup>2</sup> Toma su nombre del alemán *karst*, referido a los paisajes europeos con rocas calcáreas.



Laguna Las Calles, en jurisdicción del municipio de Vetas.





Paisaje del páramo de Almorzadero, vereda Corral Falso, municipio de Cerrito.



## Complejo del páramo de Almorzadero

---

Para localizar el páramo de Almorzadero, es necesario ubicarnos en su área geográfica más amplia, que para el caso del departamento de Santander sería dentro de los límites de la Provincia de García Rovira y la parte sur del Distrito de Manejo Integrado Páramo de Berlín (integrado a Santurbán). El páramo de Listará funge como una barrera geográfica entre los municipios de Guaca y San Andrés, localizados en su margen occidental, con los municipios de Málaga, Concepción y Cerrito, ubicados al oriente. Hacia el sur, conecta con el Parque Nacional Natural del Cocuy en el departamento de Boyacá. En Santander, los paisajes de más fácil acceso a él se presentan por la vía de Málaga a Pamplona, con sus variantes por carreteras sin pavimentar desde el municipio de Cerrito.

Hacia el borde occidental del páramo de Listará se presentan rocas sedimentarias del Triásico, pero predominan rocas sedimentarias en capas rojas del Jurásico de origen fluvial (formaciones de Jordán y de Girón), y sobre estas reposa la secuencia de rocas marinas del Cretácico. Estas últimas rocas presentan geoformas de colinas y sierras con escarpes y laderas de fuertes pendientes en las areniscas y calizas, así como valles donde se aprecian lodolitas que han formado suelos fértiles que se usan actualmente para cultivos y ganadería.

En las partes altas del páramo, el paisaje está marcado por el ambiente de denudación que rodeaba las masas glaciares (zona periglacial), y allí se distingue la roca fresca en sierras que se alargan de sur a norte, en la dirección predominante de los estratos. Estas rocas sedimentarias de origen continental y marino se acumularon en una depresión limitada por la falla de Baraya al occidente y la falla del río Servitá al oriente.

Durante la formación de la Cordillera Oriental, las fallas invirtieron su movimiento y se volvieron fallas inversas que levantaron las rocas antiguas. La posterior erosión (denudación climática) de las rocas más jóvenes en esta parte del páramo y de la cordillera ayudó a la exhumación o exposición de estas unidades geológicas. Durante estos procesos de levantamiento de la cordillera, las fuerzas que comprimen las rocas hacen que, además de fallas y fracturas, también se formen pliegues o arrugas en la cubierta sedimentaria. Este tipo de paisajes de pliegues son espectaculares en la geología de Santander, sobre todo en las zonas de páramo, donde se pueden apreciar de mejor manera los estratos, debido a la denudación y al escaso suelo y la poca vegetación que las cubre.

El paisaje en el páramo de Almorzadero es diferente al de los páramos de Listará o de Santurbán, básicamente, por el tipo de rocas que allí afloran. Así, en el sector más visible de este páramo se registran rocas sedimentarias del Paleógeno, formadas en ambientes transicionales entre el mar y el



A lo largo del complejo del páramo de Santurbán, se observan distintas formaciones geomórficas llamadas dolinas. La composición química del material y la presencia de depresiones hídricas en valles propician estas formaciones geológicas.



Dolinas, estructura propia de terrenos en dinámica geológica, páramo de Almorzadero.



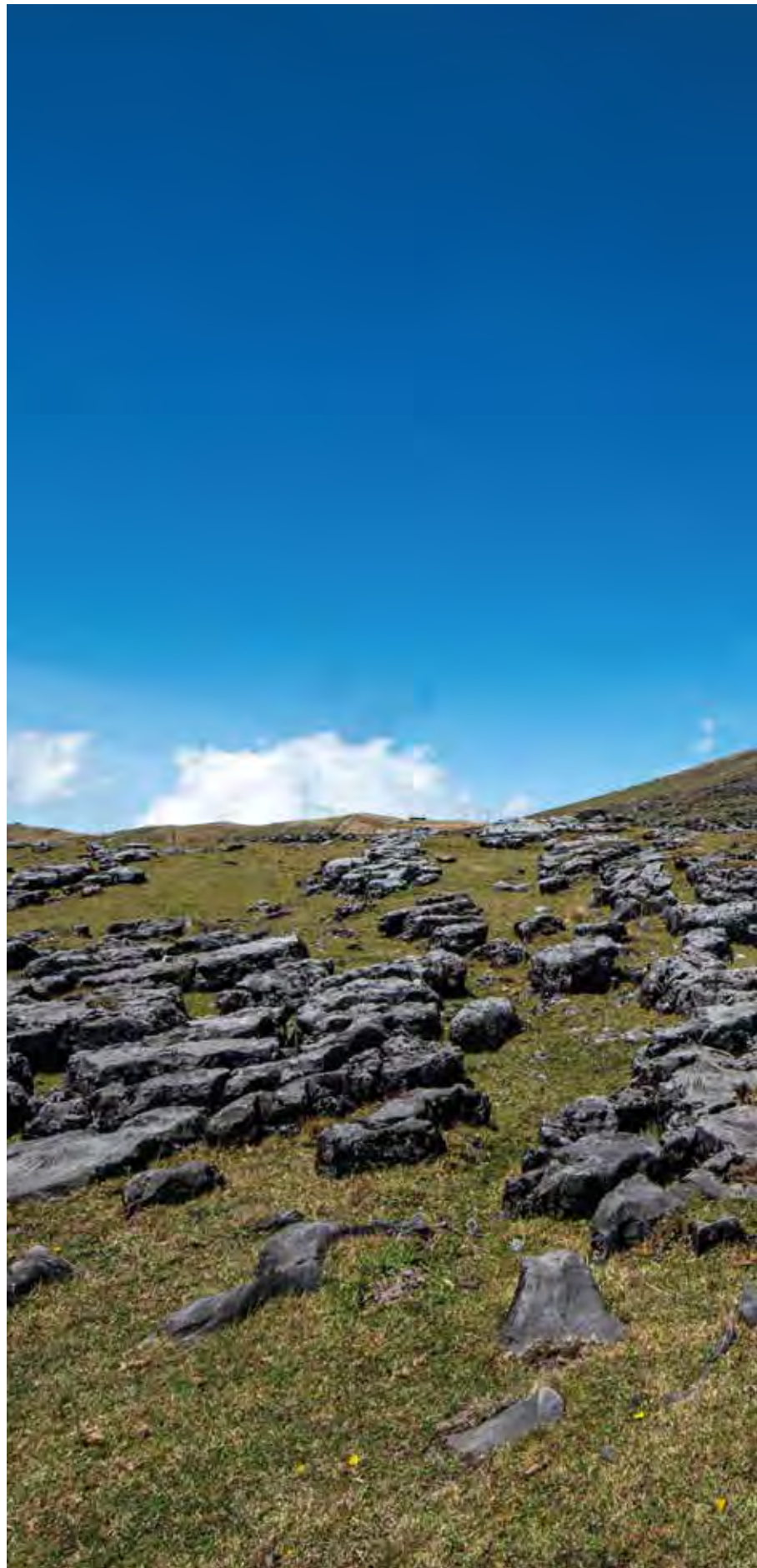
continente, donde se presentan condiciones de mar superficial con algunas playas, zonas de lagunas costeras con abundante manglar, pantanos, ciénagas e influencia de grandes ríos que depositan material de arenas y lodos. La posterior litificación de estos sedimentos implicó también la formación de carbón, cuya extracción definió actividades mineras en el páramo en décadas pasadas.

Este tipo de rocas se encuentran muy deformadas a lo largo del páramo, cuyo significado es la abundancia de pliegues y fallas geológicas. La erosión de estas geoformas plegadas brinda un paisaje espectacular de sierras y colinas con escarpes notorios, laderas estructurales y espinazos en las rocas duras (areniscas), en contraste con profundos valles con corrientes que fluyen por las rocas blandas (lodolitas).

Las formas que dejan las fallas geológicas también se hacen evidentes en los valles de ríos muy rectos; en los escarpes alineados del terreno; en los espinazos truncados, como en facetas en forma de triángulos, y, además, en lomos o lagunas controlados por la falla, así como en quebradas que cambian su curso bruscamente y de forma angular al pasar por la zona de falla.

Así mismo, el paisaje en estos páramos también es modelado por los movimientos en masa de la tierra (reptación, deslizamientos, flujos), controlados especialmente por la gravedad en la montaña, levantada por procesos tectónicos, que, a su vez, puede ser destruida por este agente y por el efecto de los factores climáticos que a esas alturas provocan una fuerte erosión y una constante formación de relieve.

Formaciones rocosas que hacen parte del paisaje propio del páramo.







Laguna Los Pajaritos, un paisaje propio de nuestros páramos.



## Distrito minero de California-Vetas

---

El distrito minero de California-Vetas es un área localizada en la recientemente denominada Provincia de Soto Norte, como parte del Macizo de Santander. Esta área presenta una topografía variada, en donde se observan terrenos altos que pueden alcanzar cotas de hasta 3600 metros sobre el nivel del mar, coincidentes con los denominados paisajes paramunos (de páramos) de nuestra bella geografía santandereana.

En contraste con estas tierras altas, el área del distrito minero de California-Vetas presenta también valles encañonados por donde circulan diferentes afluentes, como, por ejemplo, los ríos Vetas y Tona y las quebradas Móngora y La Baja, entre otras, con cortes o incisiones de hasta 1500 metros, calculados desde la base de los valles hasta la superficie de las tierras más altas.

Para llegar al distrito minero de California-Vetas, se puede acceder principalmente por la vía que comunica a Bucaramanga con Matanza, Suratá y California, distante unos 54 kilómetros al nororiente de la capital santandereana, en un recorrido vehicular que puede tardar menos de dos horas. La otra vía de acceso a este distrito es por la vía Bucaramanga Pamplona, hasta llegar al altiplano de Berlín, concretamente hasta el corregimiento de Berlín, que hace parte del municipio de Tona; una vez allí hay que desviarse en dirección norte por la vía que conduce hasta Vetas, o el Municipio Blanco de Colombia, título que obedece a que cuando se está llegando al pueblo, en un tramo ubicado a cierta altura, donde se localiza un perfecto mirador del entorno, las bellas casas coloniales de paredes blancas, enclavadas en esas pendientes laderas de



Formaciones rocosas en el valle de la quebrada La Honda, municipio de California.

Rocas que emergen y se yerguen en medio del paisaje nos remiten a instancias temporales que nos ubican en diferentes momentos y escenarios de la historia de nuestro planeta.

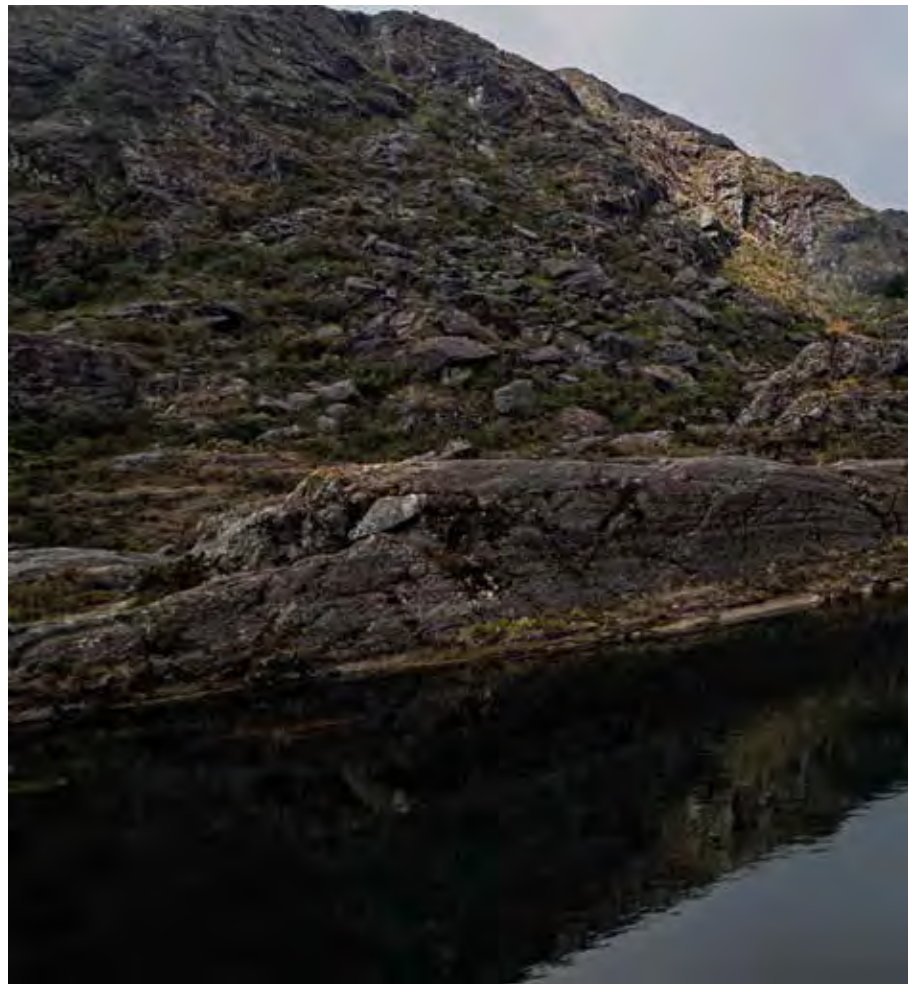


Paisaje de páramo en la ruta hacia la laguna de Páez.

las montañas del Macizo de Santander, atraen inmediatamente la mirada de los visitantes. El acceso en automóvil al distrito minero por esta vía tarda unas dos horas y media por un trayecto de aproximadamente 83 kilómetros.

Esta área de nuestro departamento de Santander tiene una particular historia geológica. Además de haber sido privilegiada por la naturaleza con sus hermosos paisajes, también cuenta con enormes contenidos de oro, plata, cobre, zinc y plomo, entre otros metales preciosos y de base presentes en el subsuelo.

Su riqueza natural llamó primero la atención de los indios chitareros; posteriormente, de los españoles y de los franceses, durante la época colonial, y, más recientemente, de los canadienses, los brasileros y los árabes, entre otros. Los pobladores del distrito minero de California-Vetas son gente muy laboriosa, amable y conocedora de la actividad minera, es decir, de la explotación de las riquezas



Detalle. Laguna Las Calles.

La abrupta geografía de los valles y una decena de pequeñas quebradas que bajan del páramo, cuyo nacimiento está asociado con las lagunas, conforman el paisaje de la zona minera próxima al municipio de California.





Valle del río Charta desde el municipio de Vetas.



Estructura geológica que se conforma en el paisaje del páramo de Santurbán.

auroargentíferas presentes en su territorio, ocupación que ha servido de base para el sustento de la población desde tiempos ancestrales.

Considerando que este libro está dedicado a la descripción de los paisajes geológicos de nuestro territorio, no haremos mayor alusión a la rica historia de estos municipios, pues no es precisamente nuestro objetivo. Sin embargo, se debe resaltar un hecho histórico importante para la ciencia: la presencia en estos territorios del estudioso español José Celestino Mutis, más conocido como el Sabio Mutis. Durante la segunda mitad del siglo XVIII, Mutis se radicó en el sector conocido como La Baja, en inmediaciones del hoy municipio de California, donde adelantó importantes estudios sobre la botánica y la minería en la región.

El distrito minero de California-Vetas se compone principalmente de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias. Las rocas metamórficas presentes

en el área hacen parte del denominado Gneis de Bucaramanga, considerada la unidad de rocas más antigua reconocida en el Macizo de Santander, con edades de 900-1200 millones de años; es decir, está constituido por rocas precámbricas.

En cuanto a las rocas ígneas presentes en el distrito minero, predominan las litologías graníticas formadas durante un periodo que va de 205 a 194 millones de años (Triásico tardío – Jurásico temprano). Estas rocas ígneas allí presentes hicieron parte, en su mayoría, de antiguas cámaras magmáticas (cuerpos plutónicos), a las que, de manera coloquial, se las puede considerar como las raíces de los sistemas volcánicos. Esto significa que hace millones de años esta región de nuestro territorio fue afectada por procesos magmáticos que formaron sistemas volcánico-plutónicos; no obstante, los procesos geológicos posteriores contribuyeron a erosionar los posibles antiguos edificios volcánicos que pudieron existir en esa



época, de los cuales hoy solo permanecen las partes profundas de esos sistemas magmáticos (cuerpos plutónicos).

Las rocas sedimentarias presentes en el distrito minero presentan un área más restringida, con edades de alrededor de 140-130 millones de años, formadas en ambientes aluviales y marinos someros. Estas rocas sedimentarias suelen cubrir las rocas ígneas. Una vez mencionado esto, es importante resaltar que ninguna de las rocas referidas puede ser identificada como responsable de la formación de los depósitos de metales preciosos, como el oro, o de metales base, como el cobre, presentes en el distrito minero. En otras palabras, no hemos mencionado cuáles son las rocas que generan la mineralización, ni tampoco hemos hecho alusión a las rocas ni a los procesos responsables de la formación de esos enormes recursos naturales no renovables allí presentes.

Para empezar responder a lo señalado en las anteriores líneas, debemos, ante todo, indicar que las riquezas de metales preciosos (oro, plata) y metales base (cobre, zinc, plomo) presentes en el distrito de California-Vetas se formaron durante varios eventos geológicos relacionados con inyecciones de magmas hidratados de temperaturas de alrededor de 800-900 °C, diferentes de los magmas que originaron las rocas ígneas de 204-194 millones de años ya mencionadas (estos magmas eran anhidros, es decir, estaban desprovistos de agua).

Las inyecciones de magmas hidratados que afectaron sectores puntuales del distrito minero de California-Vetas ocurrieron en diferentes momentos de los últimos 10 millones de años, concretamente entre 10,1 y 1,6 millones de años (Mioceno-Plioceno-Pleistoceno; Mantilla *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2017). Este periodo coincide con la fase más reciente de orogenia



Paisaje del páramo de Berlín.



Laguna Las Cuntas en el páramo de Santurbán.



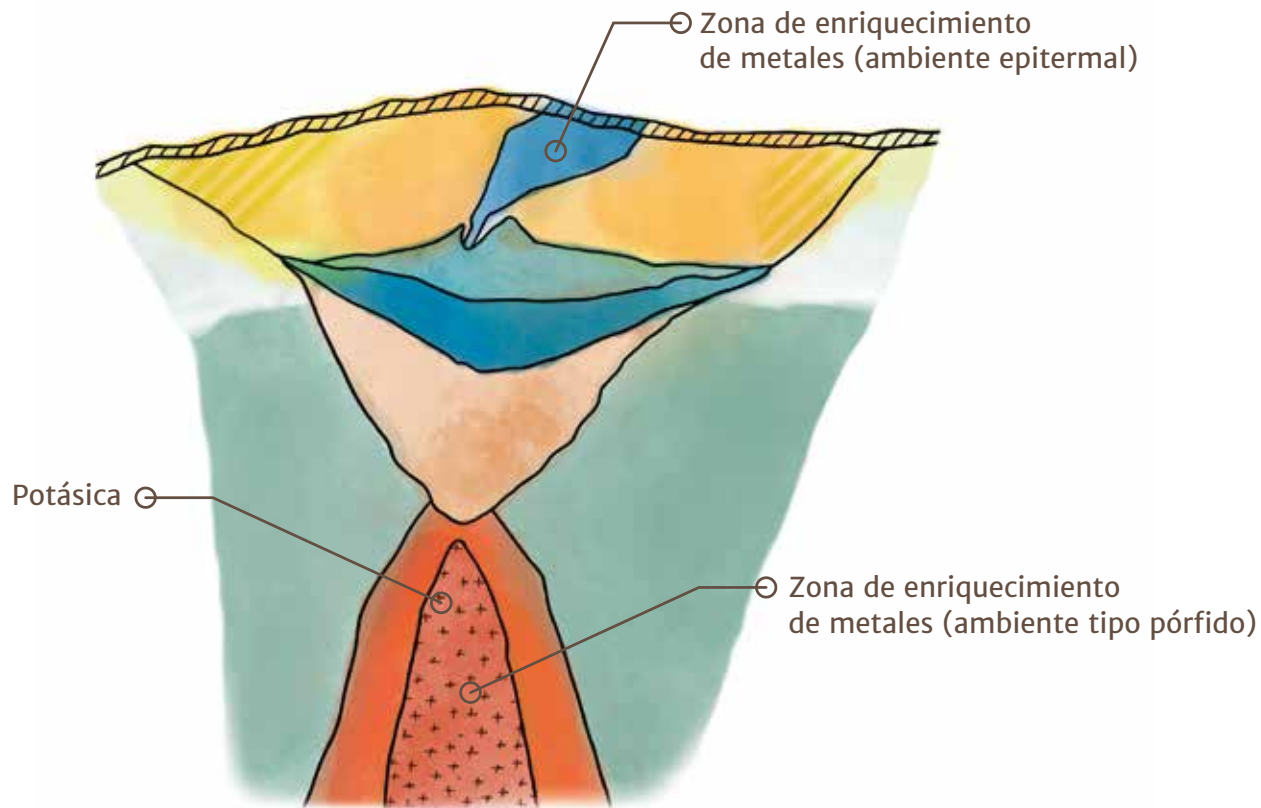
Laguna del medio en el complejo lagunar Las Verdes, páramo de Santurbán.



Andina, correspondiente a la fase de deformación que causó el levantamiento de los Andes septentrionales, debido al choque de Suramérica con Panamá.

El origen de esos magmas hidratados que formaron los depósitos minerales del distrito de California-Vetas es todavía un tema de debate científico; sin embargo, apoyados en los datos disponibles en la actualidad, se considera que esos magmas hidratados se originaron a una profundidad similar a las máximas profundidades reportadas para los sismos profundos que afectan hoy nuestro territorio, asociados con el denominado nido sísmico de Bucaramanga, es decir, a unos 150-120 kilómetros de profundidad en promedio. Los datos existentes hasta la fecha (Mantilla *et al.*, 2013; Bissig *et al.*, 2014) apuntan a que esos magmas hidratados evolucionaron a partir de magmas formados en el manto terrestre, en cuyo ascenso asimilaron algo del material presente en la corteza terrestre. En resumen, podemos decir que muy por debajo del área del distrito minero California-Vetas, a la profundidad ya referida, algunos minerales allí presentes con contenidos de agua en su estructura cristalina (por ejemplo, la serpentina y el anfíbol) sufrieron descomposición (transformaciones acompañadas de liberación de agua), debido al flujo de calor astenosférico. Se considera que el agua presente en la estructura cristalina de esos minerales proviene del agua del mar con la que debieron interactuar parte de las antiguas rocas del lecho marino de las placas Nazca y Caribe, antes de que fueran llevadas por los procesos tectónicos hasta las profundidades ya mencionadas.

Los procesos referidos, es decir, la liberación en profundidad de agua y de otros componentes presentes en los minerales de las rocas que una vez fueron parte del lecho marino, sumados a la interacción de estas soluciones con las rocas



**Figura 35.** Esquema ilustrativo de la relación de las zonas con importante enriquecimiento de metales preciosos y metales base (pórfido y epitermal; los diferentes colores corresponden a zonas con diferentes minerales formados por interacción entre fluidos y rocas). Modificado de Sillitoe (2010)

anhidras del manto terrestre, favorecieron la generación de fundidos o magmas, que generalmente ascienden desde una profundidad aproximada de 150-120 kilómetros, y atraviesan la litósfera hasta alcanzar la superficie terrestre.

En términos generales, durante ese ascenso hacia la superficie terrestre, el magma suele cambiar progresivamente su composición, por ejemplo, se enriquece en  $\text{SiO}_2$ ; esto favorece la concentración progresiva de la fase volátil del magma (por ejemplo, el agua) a medida que este asciende y se acerca a la superficie terrestre. Los procesos que acompañan el ascenso del magma a lo largo de esta columna de unos 150-120 kilómetros han sido intensamente estudiados en el mundo en los últimos años, y se ha concluido que esos magmas hidratados pueden llegar a formar una especie de cuerpos rocosos de estructuras cilíndricas, a profundidades de 3-4

kilómetros, que ocasionalmente concentran importantes contenidos de cobre, molibdeno y oro, entre otros elementos.

Estas estructuras rocosas mineralizadas de aspecto cilíndrico se denominan cuerpos porfiríticos. En algunas ocasiones, por encima de estos cuerpos, a profundidades inferiores a 1,0-1,5 kilómetros, también es posible que se forme una zona que puede contener oro ( $\pm$  cobre), plata, zinc, plomo. A estas zonas de profundidad somera con mineralizaciones de metales preciosos y metales base se las suele llamar epitermales (véase la figura 35).

Los minerales formados tanto en los ambientes de mineralización porfirítica como epitermal suelen ser ricos en azufre, es decir, forman sulfuros, como, por ejemplo, la pirita y la calcopirita. Se denominan minerales primarios

aquellos formados en diferentes momentos de la inyección de los magmas hidratados, que dieron origen a los cuerpos rocosos de aspecto cilíndrico denominados pórfidos, a 3-4 kilómetros de profundidad, o aquellos creados durante la interacción con los fluidos que se separaron de estos últimos y ascendieron hasta el ambiente epitermal, a 1,0-1,5 kilómetros de profundidad.

En el distrito minero de California-Vetas es posible encontrar en un determinado sector varios minerales primarios relacionados con diferentes pulsos o eventos mineralizantes, es decir, en un mismo sector pueden existir evidencias de superposición de varios minerales primarios asociados con diferentes pulsos mineralizantes; en ocasiones se observan minerales primarios formados en ambientes donde es usual encontrar

pórfidos con una superposición de minerales primarios de ambiente epitermal. Este tipo de observaciones permite concluir que estos yacimientos se formaron a medida que el sistema montañoso que hoy los contiene estaban en proceso de levantamiento, es decir, de formación de montañas. En el distrito minero de California-Vetas, los mayores contenidos de oro suelen estar relacionados con aquellos sectores donde se desarrollaron minerales primarios en ambientes de tipo epitermal.

Finalmente, y como curiosidad que nace en la observación de sus paredes de masas de minerales de color azul verdoso, como calcantita, brochantita y otros minerales sulfatos (véase la figura 36), se estima que los minerales primarios antes referidos suelen resultar



Paisaje del páramo de Listará

Se evidencian las huellas de una historia geológica cuyo común denominador es el agua, como poderoso escultor de cientos de formas dibujadas sobre la piel de la Tierra.

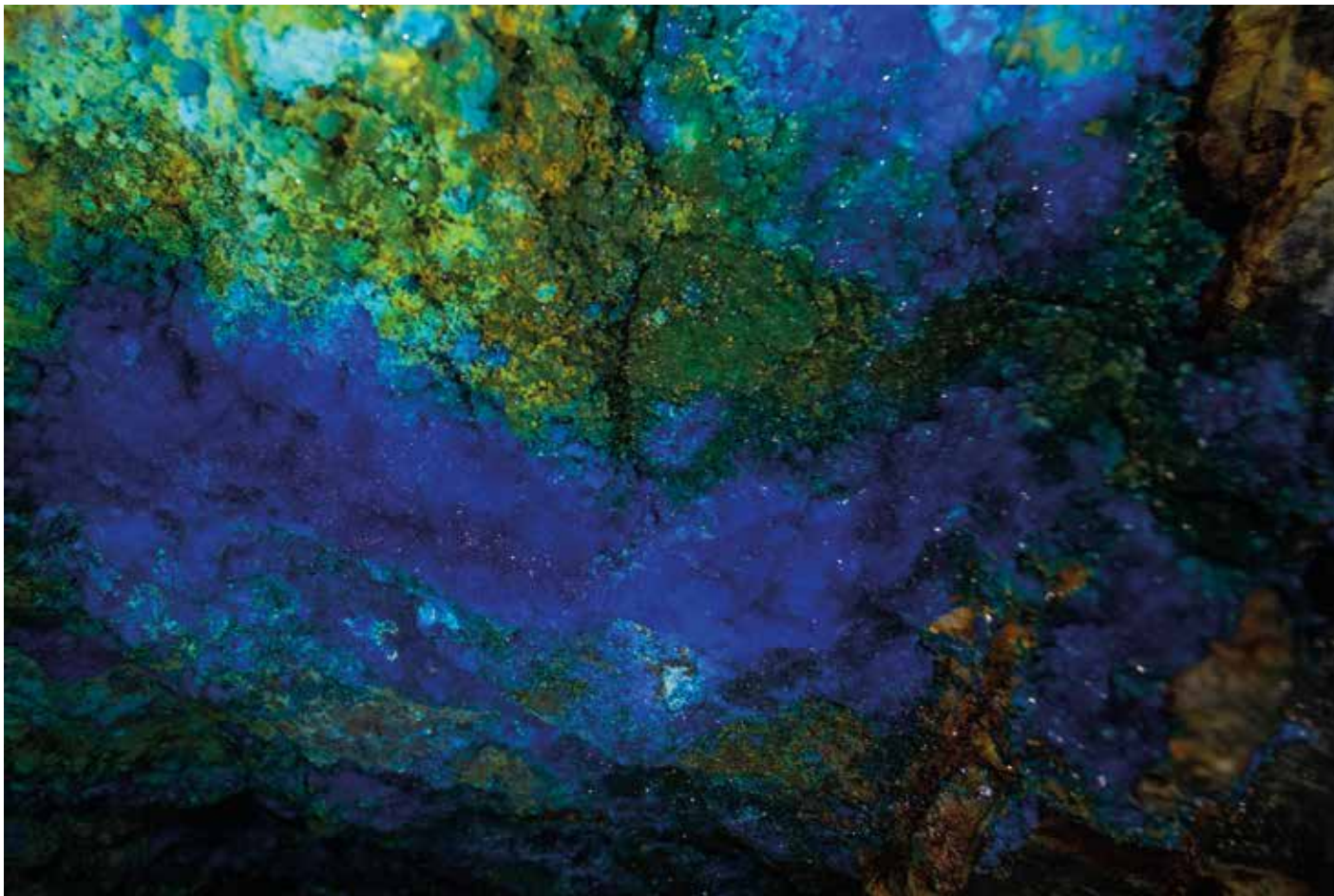


Valle del páramo de Berlín en el complejo de Santurbán.

afectados o alterados con posterioridad a su formación. La causa de estos daños es el paso de las aguas meteóricas, que pueden infiltrarse por microfracturas o fracturas presentes en las rocas, a tal punto que pueden hacerlas desaparecer parcial o totalmente, y esto da origen a nuevos minerales más estables en esos nuevos ambientes más someros; a estos nuevos minerales se los conoce como secundarios o supergenos.

Otro ejemplo de la formación de minerales secundarios es la presencia de puntuales masas o cristales de tonalidades verdosas, observados generalmente en inmediaciones de la iglesia de San Antonio. Estos minerales han sido identificados como de tipo autunita, torbernita, es decir, son minerales secundarios de uranio.

Como comentario concluyente sobre los paisajes geológicos del distrito de California-Vetas, merece la pena señalar que esa área debió haber desarrollado importantes nacimientos de aguas termales, de niveles de acidez variable, durante los últimos millones de años, concretamente entre 10,1 y 1,6 millones de años. Esto como consecuencia de la inyección a profundidad de los magmas hidratados responsables de la formación de los principales depósitos minerales allí presentes: los magmas hidratados (y las soluciones, fluidos o aguas separadas o antes sueltas de los magmas) dieron origen a la formación de las grandes concentraciones de metales preciosos y metales base que caracteriza ese hermoso y rico territorio de nuestra geografía departamental.



**Figura 36.** Aspecto de los minerales secundarios (mayoritariamente sulfatos de cobre), presentes en túneles abandonados del sector de San Antonio, municipio de California





Paisaje propio de los siembras de cebolla y papa en el páramo de Berlín.



## **Paisajes geológicos del tramo Tona - El Picacho**

---

El paisaje del tramo Tona - El Picacho puede considerarse una muestra de las condiciones geológicas del Macizo de Santander, donde surgen rocas metamórficas de alto y medio grado del Paleozoico (Ortogneis y Esquistos de Silgará) y rocas cristalinas de origen ígneo del Jurásico. Este basamento de rocas está localmente cubierto por rocas sedimentarias en capas de color rojo derivadas de ambientes fluviales del Jurásico o por rocas sedimentarias formadas en ambientes marinos. Todas han sido afectadas por fallas geológicas y otras estructuras de deformación.

Llama la atención la forma alargada de sur a norte en que se presentan las rocas sedimentarias delimitadas por fallas geológicas e inconformidades. Aunque son solo fragmentos o cuencas locales que fueron parte de extensas cuencas marinas, alcanzan a mostrar que las rocas del basamento del Macizo de Santander constituyeron un relieve o borde de la cuenca marina. Hoy se expresan con inclinación al occidente a favor de la pendiente, en la margen oriental del macizo.

En las rocas ígneas son más intensos los procesos de descomposición de la roca, debido a la presencia de minerales feldespáticos que reaccionan más fácilmente con el agua para generar arcillas. La meteorización química y física provoca fragmentación de las rocas, y en algunos sitios se puede observar la formación de esferas de roca fresca rodeadas de material más descompuesto (meteorización esferoidal o en cebolla).



Morro conocido como El Picacho, la mayor elevación de el páramo de Berlín.

Durante los procesos de levantamiento del Macizo de Santander, las rocas sedimentarias incorporan de forma más evidente la deformación, que se evidencia en pliegues y fallas. Las rocas más resistentes, como las areniscas y las calizas, conservan la inclinación constante hacia el oriente, pero las rocas más blandas o con más intercalaciones de capas delgadas se doblan y se pliegan de manera más fácil. Estos espectaculares pliegues asociados con fallas geológicas se pueden observar por la vía que desde Tona conduce al páramo.

Las calizas también son rocas resistentes al corte, pero en una observación más detallada pueden verse de forma clara las estrías provocadas por la fricción y el desplazamiento a lo largo de las fallas. Adicionalmente, por las fisuras y diaclasas causados durante los procesos de deformación de la cordillera, el efecto del agua es más evidente por la disolución que ocurre a lo largo de este tipo

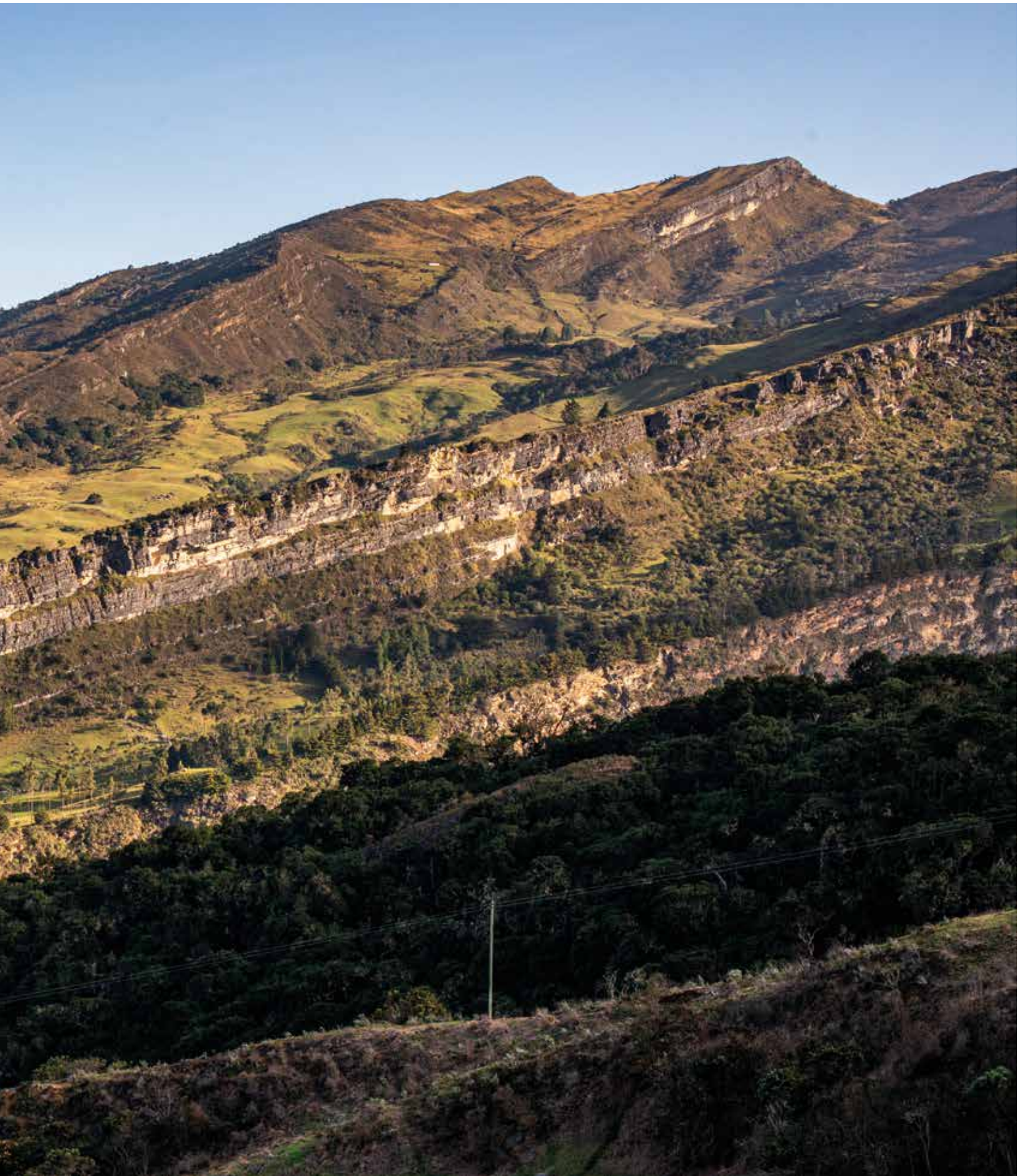
de fracturas. Las geoformas de tipo kárstico a nivel superficial son características en las rocas calcáreas del macizo, como los regueros y los goteos, debido a la caída y el escurrimiento de agua lluvia sobre las rocas o el hundimiento del terreno en forma de dolinas. Este tipo de geoformas locales y estrías de falla en afloramientos son comunes en la zona de El Picacho.

Es importante destacar que en esta zona la mayoría de fracturas y algunas fallas están orientadas hacia el suroriente, dirección hacia la que también se inclinan las rocas sedimentarias porosas, como las areniscas. Esta tendencia garantiza que tanto las corrientes de agua superficial como las subterráneas fluyan de forma más fácil por los canales o corredores definidos por este patrón de fractura. Esto define la recarga de acuíferos en la parte baja del páramo y la aparición de manantiales asociados con las fracturas y las fallas geológicas.





Formaciones geológicas en cercanías de la vereda Tembladero del municipio de Tona.





Quebrada Pericos, afluente del Chicamocha, en cercanías del municipio de Cepitá.



## **Paisaje geológico del Cañón del Chicamocha (tramo San Joaquín – Ricaurte – Cepitá – Pescadero)**

---

El Cañón del Chicamocha emerge como una maravilla natural moldeada por los procesos geológicos y la acción del río Chicamocha. Este río nace en el departamento de Boyacá, drena una tercera parte de las aguas de ese departamento y, posteriormente, se adentra en Santander, en donde labró la parte más profunda del cañón. La cuenca de influencia del río Chicamocha es de aproximadamente 1536 kilómetros cuadrados.

El Cañón del Chicamocha tiene su origen en inmediaciones del municipio de Tuta, cerca de los municipios de Paipa y Paz de Río, y termina su recorrido poco después de su encuentro con el río Suárez, en el sitio llamado Juntas, donde entonces comienza a formarse el río Sogamoso.

Este cañón descubre en sus riscos y en sus empinadas laderas la historia geológica de los departamentos de Boyacá y Santander. A lo largo de 227 kilómetros, podemos apreciar el mundo biótico y abiótico que se descubre por diferentes carreteras y caminos que ponen estas maravillas al alcance del viajero y del caminante. Se estima que su máxima profundidad sería de aproximadamente 2000 metros en el sector de Los Santos, en el tramo Cepitá-Pescadero. Estos sitios son visibles a escasos 54 kilómetros de Bucaramanga por la vía al sur que lleva hasta la capital de nuestro país.

La palabra ‘chicamocha’ proviene de la lengua guane. *Chica* significa ‘hilo de plata’, y *mocha*, ‘noche de luna llena’; el resultado es un significado de alta carga poética, como ‘hilo de plata en noche de luna llena’.



Este imponente cañón, nombrado y contemplado en su momento por la extinta tribu guane, fue preseleccionado en 2009 por la fundación Nuevas Siete Maravillas Naturales del mundo como candidato para integrar el selecto grupo de los nuevos descubrimientos naturales que asombran al mundo.

Ahora bien, ¿qué es un cañón? Es un accidente geográfico producido por la acción constante de un río que va socavando terrenos sedimentarios y formando profundas hendiduras. A la acción del río se suman importantes procesos geológicos, como tectonismo, erosión y meteorización, que propician la creación del cañón.

El trazo del Cañón del Chicamocha en su parte media, desde Ricaurte hasta Pescadero, en Santander, es rectilíneo, siguiendo la falla de Bucaramanga – Santa Marta. Después de Pescadero, gira abruptamente 120° al suroccidente, luego se enrumba al noroccidente, posteriormente se une al río Suárez y gira al occidente para conformar el río Sogamoso.



Río de plata a la luz de la Luna, como traduce el término 'chicamocha', adoptado del lenguaje indígena guane.



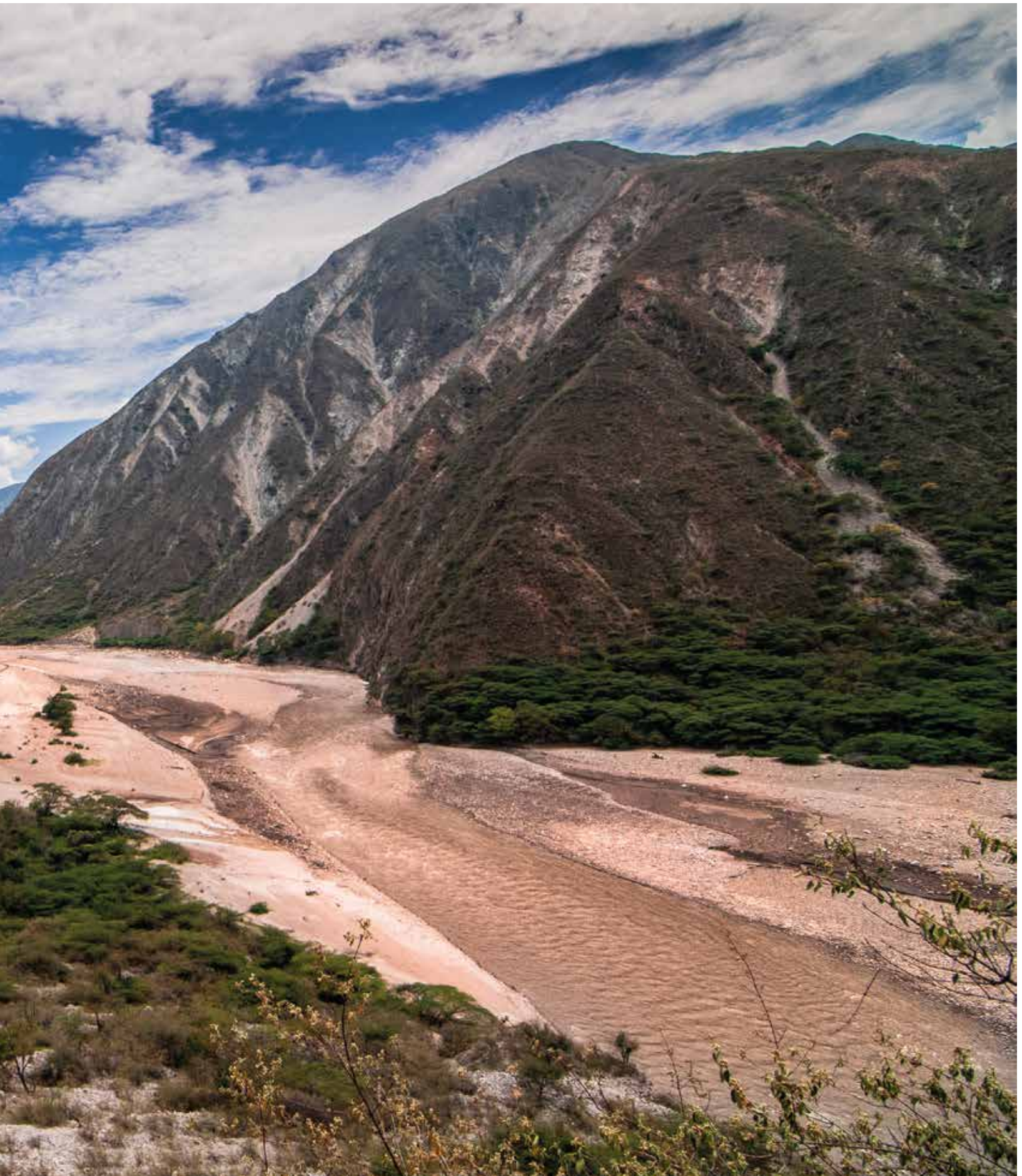
Valle del río Chicamocha a la altura del municipio de Capitanejo.



Paisaje del Chicamocha en inmediaciones del corregimiento de Pescadero, municipio de Piedecuesta.



Cañón del Chicamocho en jurisdicción del municipio de San José de Miranda.





El Chicamocha y sus madresolas, en cercanías del municipio de Cepitá.

En el tramo San Joaquín – Ricaurte – Cepitá – Pescadero, el cañón expone buena parte de la historia geológica de este sector del Macizo de Santander. Esta historia se remonta 1400 millones de años atrás, cuando se formó la roca parental, que, posteriormente, por un proceso geológico denominado metamorfismo, dio origen a rocas agrupadas en la unidad geológica conocida como Gneis de Bucaramanga.

Más adelante ocurrieron procesos de sedimentación, metamorfismo, magmatismo y sedimentación, que conformaron el resto de las unidades geológicas, y cubren el Gneis de Bucaramanga, conocidas como Esquistos del Silgará, Formación Diamante, Formación Bocas, Granito de Pescadero, Formación Jordán, Formación Girón, Formación Los Santos – Tambor y los depósitos cuaternarios y formaciones más recientes.

La formación de estas unidades geológicas ha involucrado procesos orogénicos (levantamientos de montañas), subsidencias o hundimientos, procesos erosivos, transgresiones o avances y retrocesos del mar. Toda esta dinámica, sumada a la acción del río Chicamocha, ha dado forma y vida a este estupendo cañón.

La importancia del periodo geológico conocido como Cretácico, que inició 120 millones de años atrás, no se puede poner en duda, porque durante este periodo el mar avanzó hacia buena parte de la Cordillera Oriental, y esto favoreció la formación posterior de rocas calcáreas. Estas rocas están compuestas principalmente por minerales del grupo de los carbonatos, que se disuelven fácilmente por acción del agua. Por esta razón, estas rocas sedimentarias calcáreas son las primeras en afectarse ante la acción



Inicio de la formación del Cañón del Chicamocha en la región de Onzaga.



El Chicamocha en la zona aledaña al municipio de Aratoca.

del agua del río Chicamocha. Se calcula que el moldeado del Cañón del Chicamocha duró 30 millones de años.

Procesos como los levantamientos y las subsidencias favorecieron el depósito de sedimentos y su posterior litificación para luego convertirse en rocas sedimentarias, y, de esta manera, pudieron ser agrupadas, según su edad, en lo que los geólogos denominamos formaciones. Entre estas formaciones geológicas sedimentarias presentes en el Cañón del Chicamocha, se encuentran las formaciones Tambor – Los Santos, Rosablanca y Paja.

De manera posterior a la formación de las rocas que hoy observamos en el cañón, se desarrollaron procesos de erosión, meteorización y remoción. La erosión

ha sido producida por los movimientos tectónicos asociados a la activación de la falla de Bucaramanga y las diferentes fallas que convergen en ella con un ángulo que se aproxima a los  $90^\circ$ , como es el caso de las fallas de los ríos Umpalá y Guaca, y de algunas quebradas, como Perquizes. La meteorización química da a las rocas un peculiar color rojizo, producto de la desestabilización de minerales que contienen hierro.

El espectro de colores plateados que se contemplan cuando se desciende por la vía principal desde el cañón hacia Bucaramanga son el efecto del sol sobre la superficie de rocas micáceas de la unidad de Esquistos del Silgará. Esta vía conduce a la parte más baja del cañón en el sector de Pescadero.



Especie de ceiba barrigona, en las alturas del valle del río Manco, afluente del Chicamocha.





Paisaje a vuelo de pájaro sobre la zona del Chicamocha en el municipio de Onzaga.



### **Paisajes geológicos del tramo Onzaga-Chaguacá**

---

La falla de Bucaramanga se ramifica desde la localidad de Ricaurte (San Joaquín) en tres trazos hacia el sur, de manera que afecta las rocas ígneas y metamórficas de la zona. El principal trazo se denomina falla de Chaguacá, que pasa por el municipio de Onzaga y sube al páramo de Güina en Boyacá, donde define una divisoria de cuencas y llega hasta el municipio de Paz de Río. En este trayecto, cruza rocas sedimentarias que forman pliegues en Onzaga, y luego corta rocas metamórficas de bajo grado de la Formación Floresta y rocas sedimentarias del Paleozoico (Formación Tibet). El trazo de la falla está bien definido en el valle profundo y rectilíneo de los ríos Chaguacá y Onzaga, así como en los lomos alineados, la formación de facetas triangulares alineadas y las quebradas desplazadas por el paso de la falla.



Esta falla de Chaguacá constituye la prolongación más sur de la falla de Bucaramanga, y, junto con las fallas de Los Micos, La Chorrera y Chicamocha-Soapaga en Boyacá, configura un sistema montañoso como continuación del Macizo de Santander en la zona sur. El intenso proceso de fractura a lo largo del trazo de las fallas brinda una gran cantidad de material disponible, desde la zona de páramos en Boyacá, para la formación de abanicos aluviales que incluyen grandes bloques desprendidos; además, favorece la ocurrencia de grandes deslizamientos y de otras geoformas de movimientos en masa en las laderas de los valles.

Al paso del río Chicamocha, que se desprende de las montañas de Boyacá, comienza a conformarse primero el valle y posteriormente el profundo cañón del paisaje de Santander.





Formaciones rocosas en las estribaciones del páramo de Listará, que comparte territorio con los complejos de los páramos de Santurbán y Almorzadero.





Laguna de Ortices, en el municipio de San Andrés.



## **Paisajes geológicos del tramo Guaca – San Andrés**

---

El recorrido Guaca – San Andrés conduce a Málaga, la capital de la Provincia de García Rovira, en Santander.

Se puede decir que la puerta de entrada a esta provincia es Guaca, municipio situado a 87 kilómetros de Bucaramanga. Para llegar a él, se toma dirección al sur por la vía principal que conduce de Bucaramanga a Bogotá. Al llegar a Curos, luego de pasar por Floridablanca y Piedecuesta, se desvía a la izquierda por la carretera que bordea el municipio de Santa Bárbara, y se continúa hasta llegar al Alto de Guaca.

Desde el desvío del sitio conocido como Los Curos, la carretera va descubriendo las rocas más antiguas del Macizo de Santander, como los gneises, las anfibolitas, las migmatitas y las cuarcitas, de la unidad geológica conocida como Gneis de Bucaramanga, cuya edad aproximada es de 1400 millones de años.

En inmediaciones del municipio de Santa Bárbara, las rocas del Gneis de Bucaramanga se forman a partir de un batolito de cuarzomonzonitas, conocido como el batolito de Santa Bárbara, nombre en honor al municipio donde afloran estas rocas ígneas.

La vía, literalmente arrancada a la montaña, por la necesidad de comunicación entre los pueblos, serpentea en un viaje que va dejando al descubierto majestuosos e imponentes cañones de pendientes abruptas y agrestes, transitadas por las cabras que van haciendo camino.

La carretera se va haciendo más empinada hasta llegar al Alto de Guaca, a 2850 metros de altura sobre el nivel del mar. El descenso va conduciendo a un valle angosto flanqueado por montañas de diferente altura. Al inicio del descenso, se aprecian rocas esquistosas de la edad devónica (410-372 millones de años). Llegando a Guaca, nos adentramos en un paisaje variado, dominado por rocas cretácicas con edades de entre 145 y 113 millones de años, que corresponden al Cretácico inferior y medio.

El municipio de Guaca se encuentra, en promedio, a 2401 metros sobre el nivel del mar; sin embargo, los procesos geológicos (formación de rocas sedimentarias y evolución tectónica), sumados a los procesos modernos de erosión, han configurado cerros de diferente altura que definen varios pisos climáticos, como templado semihúmedo, páramo bajo húmedo y páramo alto superhúmedo.

Desde Guaca, por carretera, y tras un descenso leve de 12 kilómetros, se llega a San Andrés. Este recorrido se hace por un valle estrecho, en buena parte labrado por las inundaciones de ríos y quebradas que han ido acumulando depósitos aluviales denominados cuaternarios.

La carretera se desliza entre montañas constituidas por rocas que datan principalmente de los periodos geológicos Devónico, Jurásico y Cretácico inferior y medio. La secuencia cretácica está constituida por rocas de las formaciones Aguardiente y Capacho, según la división estratigráfica de la cuenca del Catatumbo, y también por rocas de las formaciones Tambor, Rosa Blanca, Paja y Tablazo, en relación con la estratigrafía de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. Estas rocas son areniscas, *shales*, calizas, rocas volcanoclásticas. Algunas de estas rocas se encuentran deformadas por la acción de las fallas de Guaca y Baraya y de algunas fallas menores locales. Esta acción tectónica ha causado fracturación y fenómenos de remoción en masa en la zona.





Vía que comunica los municipios de la Provincia de García Rovira, al filo de la montaña, conforma un paisaje de impresionantes desfiladeros.





La laguna de Orties, un pequeño espejo de agua conformado en la parte alta del Chicamocha, en geografías compartidas de los municipios de San Andrés y Molagavita.

Tras el recorrido señalado, se llega a San Andrés, municipio situado a 1675 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio de 16 °C. La topografía es abrupta, y allí se pueden alcanzar alturas de alrededor de 3000 metros sobre el nivel del mar, en cercanías al municipio de Cerrito, cuando este se adentra hacia el páramo de Almorzadero.

Los complejos lagunares de la parte más alta de San Andrés permiten acceder a las lagunas de Sumana, Jaimes, Tamana, Sisota, Arco, el Tambor, Hoyo Encantada, Lagunas Largas y Laguna Chiquita.

Sin embargo, una de las lagunas más visitadas por su clima cálido y su belleza natural es la Laguna de Orties, llena de encanto, misterio y leyendas, a donde se llega después de 2,5 horas de camino desde San Andrés.

## Referencias bibliográficas

Amaya-Ferreira, S., Zuluaga, C.A., Bernet, M. (2017). New fission-track age constraints on the exhumation of the central Santander Massif: Implications for the tectonic evolution of the Northern Andes, Colombia. *Lithos*, 282–283, 388–402.

Bissig, T.; Mantilla Figueroa L. C. y Hart, C. (2014). Petrochemistry of igneous rocks of the California-Vetas mining district, Santander, Colombia: Implications for northern Andean tectonics and porphyry Cu (–Mo, Au) metallogeny. *Lithos*, (200–201), 355–367.

Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, S. H., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A. J., y Taborda, A., 1995, Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 79 (10): 1421–1443.

García-Delgado, H.; Machuca, S.; Velandia, F. y Audemard, F. (2020). Along-strike variations in recent

tectonic activity in the Santander Massif: New insights on landscape evolution in the Northern Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102472.

García-Delgado, H., Villamizar-Escalante, N., Bernet, M. (2019). Recent tectonic activity along the Bucaramanga Fault System (Chicamocha River Canyon, Eastern Cordillera of Colombia): a geomorphological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 62.

Mantilla-Figueroa, L. C.; Valencia, V. A.; Barra, F.; Pinto J. y Colegial G. J. (2009). Geocronología U-Pb de los cuerpos porfiríticos del distrito aurífero de Vetas-California (Dpto. de Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, 31(1), 31-43.

Mantilla-Figueroa, L. C.; Bissig, T.; Valencia, V. y Craig, H. (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 235-249.

Rodríguez Madrid, A. L.; Bissig, T.; Hart, C. y Mantilla-Figueroa, L. C. (2017). Late Pliocene High-Sulfidation Epithermal Gold Mineralization at the La Bodega and La Mascota Deposits, Northeastern Cordillera of Colombia. *Economic Geology*, 112(2), 347-374.

Sillitoe, R. (2010). Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1), 3-41.

Velandia, F., Bermúdez, M. A. (2018). The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): insights from geological mapping, stress tensors, and fractal analysis. *Journal of Structural Geology*, 115, 190-207.

Velandia, F., García-Delgado, H., Zuluaga, C.A., López, J.A., Bermúdez, M.A., Audemard, F.A. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes. *Journal of Structural Geology*, 137, 104087.



El paso del Chicamocha, en jurisdicción del municipio de Molagavita.



Paso del río Chicamocha a la altura del corregimiento de San Francisco del municipio de Cepitá.

## Paisajes de la provincia de la Cordillera Oriental

### Paisajes geológicos del área de Barichara – San Gil – Charalá (cañones de los ríos Suárez y Fonce)

---

El paisaje que se nos muestra en esta hermosa área de nuestro departamento está incrustado en la parte baja de las subcuencas de los ríos Suárez y Fonce; este último es afluente del primero. Las geoformas, es decir, el aspecto paisajístico que se describe ante nuestros ojos, son un reflejo de las propiedades fisicoquímicas de las rocas. Estas se encuentran estrechamente ligadas a las características litológicas, como la cohesión, la porosidad, la dureza y la elasticidad, que determinan el comportamiento ante los esfuerzos tectónicos. En su conjunto, estas propiedades dan una respuesta específica de los materiales con respecto a los procesos erosivos, y de ello surge el relieve que hoy en día se presenta en este lugar.

Es así como las características geológicas particulares de los materiales presentes en este sector dan como resultado el relieve relativamente llano y suavemente ondulado que lo distingue, y en donde la dinámica fluvial ha horadado importantes cañones como el del río Suárez y la llamativa fisiografía que describe el río Fonce, que hacen de este sector un importante atractivo turístico.

El río Suárez nace en la laguna de Fúquene, en los límites entre Cundinamarca y Boyacá, siguiendo un curso sur-norte, con alturas que varían entre 500 y 100 metros de altura. Y es precisamente este recorrido variable con cambios importantes de altura, en relativamente cortos trayectos, lo que genera corrientes torrenciosas que resultan muy estimulantes para los amantes de





la aventura. El principal atractivo turístico de este río son los rápidos que presenta en diferentes tramos de su trayecto, aspecto que facilita la práctica de deportes extremos, como el *rafting*.

Pues bien, la respuesta al comportamiento particular del cauce se encuentra precisamente en la geología. La relativa baja dureza de las rocas a lo largo del río permite que sean entalladas por el constante trabajo de la corriente y esto, sumado a unas pendientes casi verticales en pasos estrechos, que esporádica pero repentinamente angostan el cauce, termina impulsando el flujo de la corriente y dándole ese aspecto de cañón y los atributos de belleza paisajística que atraen a primera vista.

Esas “suaves” rocas entalladas por el río Suárez están constituidas principalmente por rocas de la Formación Paja y de la Formación Tablazo, que se depositaron en el Cretácico inferior (hace aproximadamente 125 millones de años). Las rocas más antiguas están representadas por la Formación Paja (hace 130 millones de años), y se las puede observar en algunos tramos del río; son básicamente arcillolitas de color oscuro, intercaladas con rocas calcáreas, con algunas concreciones y, en algunas partes, presentan intercalaciones de yeso, mineral blanco utilizado en construcción y en la elaboración de moldes. De otro lado, estas rocas están cubiertas por



El extenso valle del río Suárez rompe la cordillera de una prolífica región que abarca buena parte de los municipios de la Provincia Comunera.

otro grupo llamado Formación Tablazo (hace aproximadamente 120 millones), constituidas principalmente por rocas calizas de colores grisáceos con intercalaciones de arcillas.

Así mismo, en este sector encontramos el río Fonce, que moldea el paisaje en las mismas unidades que lo hace el río Suárez, incluyendo, además, rocas de la Formación Simití, algo más joven que las anteriores (de edad aproximada menor a 113 millones de años). Estas rocas están conformadas principalmente por rocas arcillosas que alternan con areniscas arcillosas grises a pardas de grano fino y donde, ocasionalmente, se observan lentes de caliza.

Vale la pena señalar que de esta misma formación provienen algunos intervalos de areniscas, de donde se explotan importantes cantidades de materiales en forma de bloques y losas, que son utilizadas como rocas ornamentales en forma de enchape o para trabajos artísticos. Este recurso aporta un toque característico a la arquitectura de la región, y le da una identidad propia y muy llamativa.



Mesa de Los Santos y al fondo Bucaramanga.



## Paisajes geológicos de Las Mesas

---

La región de Las Mesas fue estudiada en 1958 por el geólogo Manuel Julivert, uno de los primeros profesores de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Esta región de morfología tabular se encuentra situada sobre la parte occidental de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, entre el Valle del Magdalena (bloque tectónico hundido relleno por sedimentos de Terciario) y el basamento cristalino del Macizo de Santander. Esta región está limitada por dos estructuras tectónicas de gran importancia: la flexión de Chucurí y la falla de Bucaramanga.

La región de Las Mesas ha sido afectada por fallas o flexiones cuyo origen alcanza el zócalo de las rocas más antiguas del Macizo de Santander; fue interrumpida por los ríos Suárez, Chicamocha, Sogamoso, Río de Oro y Lebrija, y, en consecuencia, quedó subdividida en las mesas de Lebrija, Ruitoque, Zapatoca, Los Santos y Barichara, extendidos en orden de norte a sur. Según Julivert, solo las de Ruitoque y Los Santos podrían denominarse mesas; en cambio, la de Barichara, aunque tiene un carácter tabular muy marcado, está formada por varias cuevas separadas por plataformas estructurales, y, por tanto, no cabe dentro de la denominación de mesas; la de Lebrija representa una plataforma que no cuenta con un nivel resistente que promueva el desarrollo de una morfología de mesa; y la de Zapatoca ha perdido tanto su morfología tabular como el carácter de mesa, debido al efecto de flexiones y fracturas. Existen numerosos trabajos de carácter regional que han contribuido al conocimiento geológico no solo de esta región, sino también de la Cordillera Oriental<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Por mencionar solo algunos de los varios trabajos realizados, citamos aquí a Julivert y Téllez, 1963; Ward *et al.*, 1973; Velandia y Bermúdez, 2018.



En la región de Las Mesas afloran rocas que van desde el periodo Triásico–Jurásico hasta el Cretácico. La Formación Girón del Jurásico se encuentra mejor expuesta en la plataforma de Lebrija o a lo largo de los cañones que han desarrollado los ríos Sogamoso y Lebrija, que constituyen los límites geográficos sur y norte, respectivamente, de esta plataforma. La base de esta unidad aflora igualmente hacia el borde occidental de la Mesa de Los Santos. La estratigrafía de la secuencia sedimentaria del Cretácico puede seguirse en las inmediaciones del puente del Tablazo, a lo largo de la vía Bucaramanga–Barrancabermeja (Valle Medio del Magdalena) y de San Gil. Una exposición más restringida de esta secuencia se observa en la Mesa de Los Santos. Estas secuencias estratigráficas presentan diferencias; son más arenosas por encima de las calizas que afloran en inmediaciones de San Gil, en donde ocurre una

transición de la facies cretácica del Valle Medio del Magdalena a la facies de la zona sur de la Cordillera Oriental (Julivert, 1958). La región de Las Mesas abarca estratigráficamente rocas del basamento cristalino Premesoico del Macizo de Santander, formaciones esencialmente sedimentarias depositadas desde el Triásico–Jurásico medio hasta el Cretácico (formaciones Los Santos, Rosablanca, Paja y Tablazo), así como depósitos del Cuaternario.

### **Rocas antiguas (basamento cristalino) de la región de Las Mesas**

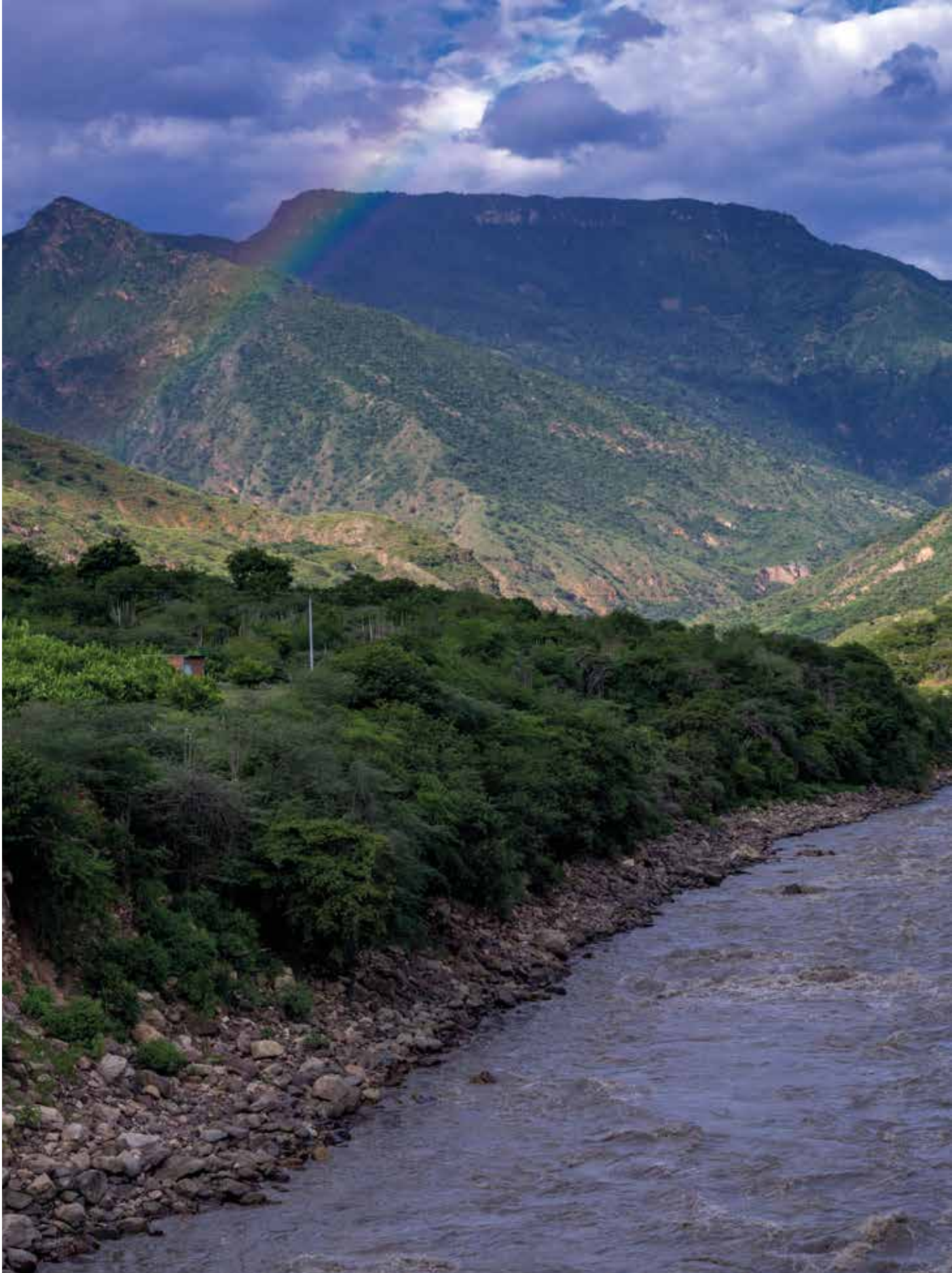
Las rocas más antiguas aflorantes en la región de Las Mesas están representadas por las unidades de rocas más antiguas del Macizo de Santander: por un lado, las rocas deformadas y metamorfoseadas del Gneis de Bucaramanga de la edad precámbrica, la Formación Silgará de la edad Paleozoica inferior y el Ortogneis de



Paso del río Suárez en cercanías del municipio de Chima.



Salto de los Caballeros en el correjimiento de San José del municipio de Suaita.



Río Chicamocha a su paso por el municipio de Jordán Sube.

la edad ordovícica, y, por otro, las rocas ígneas relacionadas con los eventos magmáticos del Triásico–Jurásico, formadas después del magmatismo sinorogénico del Paleozoico<sup>4</sup>.

Desde los años setenta se han efectuado numerosos estudios sobre las condiciones de metamorfismo de las rocas más antiguas del Macizo de Santander<sup>5</sup>. Las rocas metamórficas afloran a lo largo del Cañón del Chicamocha y en los alrededores de la Mesa de San Pedro (un relicto de pequeñas dimensiones), donde la Formación Girón descansa discordantemente sobre rocas de más bajo grado de metamorfismo. Por otra parte, las rocas ígneas del Granito de Pescadero afloran a lo largo del Cañón del Río Manco y en inmediaciones de Pescadero, cruzando el puente sobre el río Chicamocha sobre la vía nacional Bucaramanga–Bogotá.

### Rocas sedimentarias más jóvenes de la región de Las Mesas

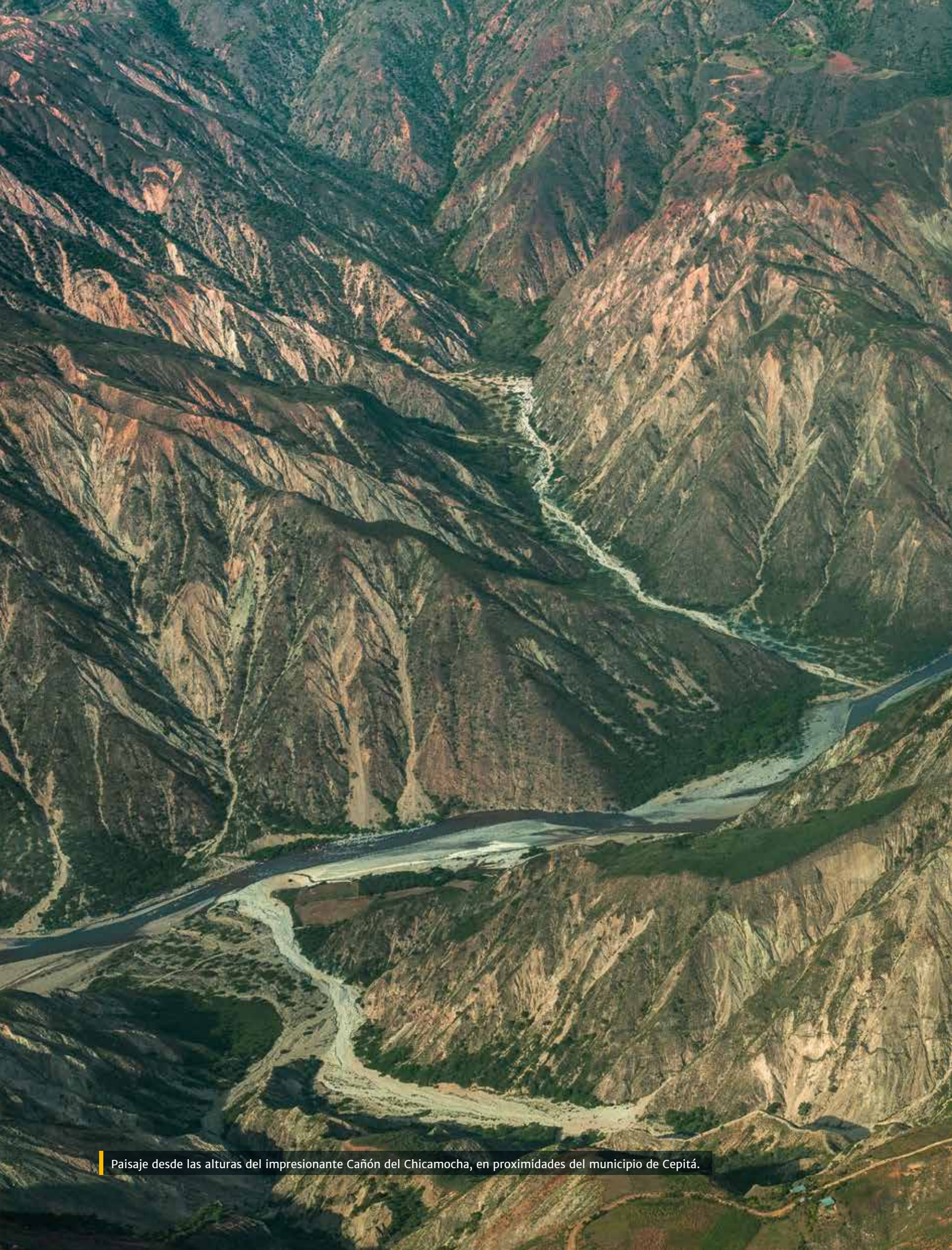
La secuencia sedimentaria aflorante en la región de Las Mesas corresponde a unidades geológicas que incluyen intercalaciones de areniscas de grano medio, grueso y ligeramente conglomeráticas, que varían en su color entre violáceo y gris verdoso. En la secuencia también es posible encontrar conglomerados de colores que van del gris amarillento al pardo rojizo con estratificación cruzada, así como lodolitas que van del pardo rojizo al violáceo, como en el caso de la Formación Girón. Igualmente, se observan areniscas conglomeráticas, lodolitas de color rojo grisáceo y cuarzo, arenisca, de color gris amarillento, con estratificación cruzada, de geometría tabular de la Formación de Los Santos (Kil); calizas de color gris azulado y fosilíferas con delgadas intercalaciones de



El Chicamocha por la zona de Pescadero, visto desde la ruta hacia la vereda Tabacal del municipio de Los Santos.

<sup>4</sup> Véase Goldsmith *et al.*, 1971; Dörr *et al.*, 1995; Ordóñez, 2003.

<sup>5</sup> De esos estudios, citamos los de Ríos *et al.*, 2003; García *et al.*, 2005; Castellanos *et al.*, 2008; Ríos y Castellanos, 2008; Mantilla *et al.*, 2016.



Paisaje desde las alturas del impresionante Cañón del Chicamocha, en proximidades del municipio de Cepitá.



rocas terrígenas, margas, calizas negras y arcillosas y calizas oolíticas de colores que van del marrón al gris con presencia de pirita de la Formación Rosablanca (Kir). Otros hallazgos registran *shales* entre arcillosos y limosos, negros y micáceos, ligeramente calcáreos y delgadamente laminados, con laminillas delgadas de yeso con presencia de concreciones fosilíferas, ocasionalmente piritosas, que albergan amonites, bivalvos, gasterópodos y peces de la Formación Paja (Kip). También, en la parte superior, hay calizas duras, azulosas y fosilíferas, y, en la parte inferior de la Formación Tablazo, margas o calizas arcillosas (Guzmán, 1985; Patarroyo–Camargo *et al.*, 2009).



Salto de Juan Curí, en el municipio de Páramo.



Río Sogamoso, en cercanías al embalse de Topocoro.

### Depósitos recientes en la región de Las Mesas

En las unidades cuaternarias del Pleistoceno–Oligoceno de la región de Las Mesas se incluyen aluviones, unos ubicados en las márgenes de las principales quebradas, y otros de talud; también se encuentran coluviones, derrumbes, terrazas asociadas al cauce de los ríos y algunas quebradas y conos de deyección. Téllez (1964) reconoce los depósitos asociados a los ríos Chicamocha y Suárez, tales como depósitos aluviales actuales, conos de deyección que desembocan en los ríos y que están excavados, depósitos torrenciales y relictos de terrazas del río Chicamocha; también identifica los depósitos de la región de Las Mesas, compuestos por costras calcáreas al sur de la Mesa de Los Santos y al norte de Barichara, suelos rojos, depósitos torrenciales rubificados al sur de la Mesa de Los Santos y al occidente de Barichara, así como rellenos de los fondos de los valles de quebradas que recorren esta región y que forman terrazas pequeñas. Julivert (1958) describe depósitos recientes en la región de Las Mesas, organizados en tres categorías. La primera categoría comprende arcillas azules, aunque algunas veces son negras y carbonosas; estas arcillas se localizan en el fondo de los valles,



Mesa de los Santos a vuelo de pájaro.

principalmente de la plataforma de Lebrija. La segunda categoría reúne los suelos rojos depositados en un clima tropical cálido, asociados a las áreas excavadas que se observan a lo largo de la vía Bucaramanga-Piedecuesta o sobre la terraza de Bucaramanga. La tercera categoría abarca suelos marrones y costras calcáreas limitadas al sur de la Mesa de Los Santos.

### Tectónica de la región de Las Mesas

Colombia se encuentra en una zona tectónicamente activa, ya que es el límite donde colisionan las placas de Nazca, de América del Sur y del Caribe. La región de Las Mesas ha sido afectada por movimientos tectónicos, cuyas manifestaciones se expresan en las numerosas fallas y zonas de alta sismicidad, y, por ello, constituye el segundo nido sísmico más importante en el mundo. Julivert (1958) considera que la tectónica que ha afectado a esta región no es de gran complejidad, cuyos límites tectónicos son la flexión de Chucurí y la falla de Bucaramanga, encargada de elevar el Macizo de Santander.

La región de Las Mesas está limitada al oriente por la falla de Bucaramanga en dirección noroccidental, reconocida como

una falla sinistral activa, especialmente por sus características morfológicas (Diederix *et al.*, 2009; Velandia y Bermúdez, 2018). La falla del Suárez en dirección norte-sur, así como en dirección nororiente-suroccidente, es considerada por Julivert (1958) como una falla normal con inclinación al este, orientada de forma paralela al río Suárez; esta falla se destaca hacia el norte y se suaviza hacia el sur, en donde presenta un carácter de flexión. Julivert (1961) indica que esta estructura tectónica rompe longitudinalmente la región de Las Mesas, de modo que forma una región occidental, compuesta por la plataforma de Lebrija y el Macizo de Zapatoca, y una región oriental, formada por las mesas de Ruitoque, Los Santos y el área de Barichara y San Gil. Desde la excelente panorámica que ofrece la vía Girón-Zapatoca, es posible observar el trazo de la falla del Suárez, cuyo nivel guía es la Formación Rosablanca, que ha sido desplazada en su componente vertical aproximadamente 800-1000 metros, de manera que es posible advertir los bloques colgante y caído y el escarpe de falla (Caballero y Reyes, 2015; García-Delgado *et al.*, 2020).



## Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos más significativos de esta región están representados en una antigua plataforma excavada por la acción de los ríos Suárez, Chicamocha y Sogamoso. No obstante, según Julivert (1958), no se trata solo de simples superficies estructurales, sino que se constituyen como mesas. De hecho, hay argumentos a favor de la pertinencia de esa denominación para las mesas de Ruitoque y Los Santos. De otra parte, a pesar de que en esta región es común la ocurrencia de geoformas del tipo de cuevas, aún se preservan los relictos de la plataforma original, y estos apenas han sido excavados por la red de drenaje compleja que existe allí, con cauces meandriiformes y perfiles en avanzado estado de evolución. De esta manera, la acción de estos ríos ha labrado profundos cañones, dentro de los que se destaca el majestuoso Cañón del Chicamocha. Estas morfoestructuras relécticas se caracterizan por una morfología plana, pendientes suaves con pequeñas colinas hacia la parte central del área, laderas con pendientes entre moderadas y altas y escarpes hacia sus bordes; además, hacia su parte superior, aflora la cobertera cretácica con farallones de paredes verticales pertenecientes a las areniscas de la Formación de Los Santos. Otro de los rasgos geomorfológicos que se destacan en esta región es el paisaje kárstico, que se desarrolló debido a la meteorización física y química, así como por la erosión que ha afectado a las rocas de la Formación Rosablanca en todas los relictos de la antigua plataforma en donde aflora esta unidad sedimentaria. Las principales geoformas que se observan allí son poljes, uvales, campos de lapiazes, sumideros, escarpes de fallas, facetas triangulares y colinas residuales, entre otras (Zafra, 2019). En Zapatoca existen diferentes cavidades kársticas, dentro de las que se destacan la cueva El Nitro, a la que se accede a través de un campo de lapiazes de gran profundidad, y la cueva Las Alsacias, que obliga a pasar un abismo o trampa para llegar a ella.



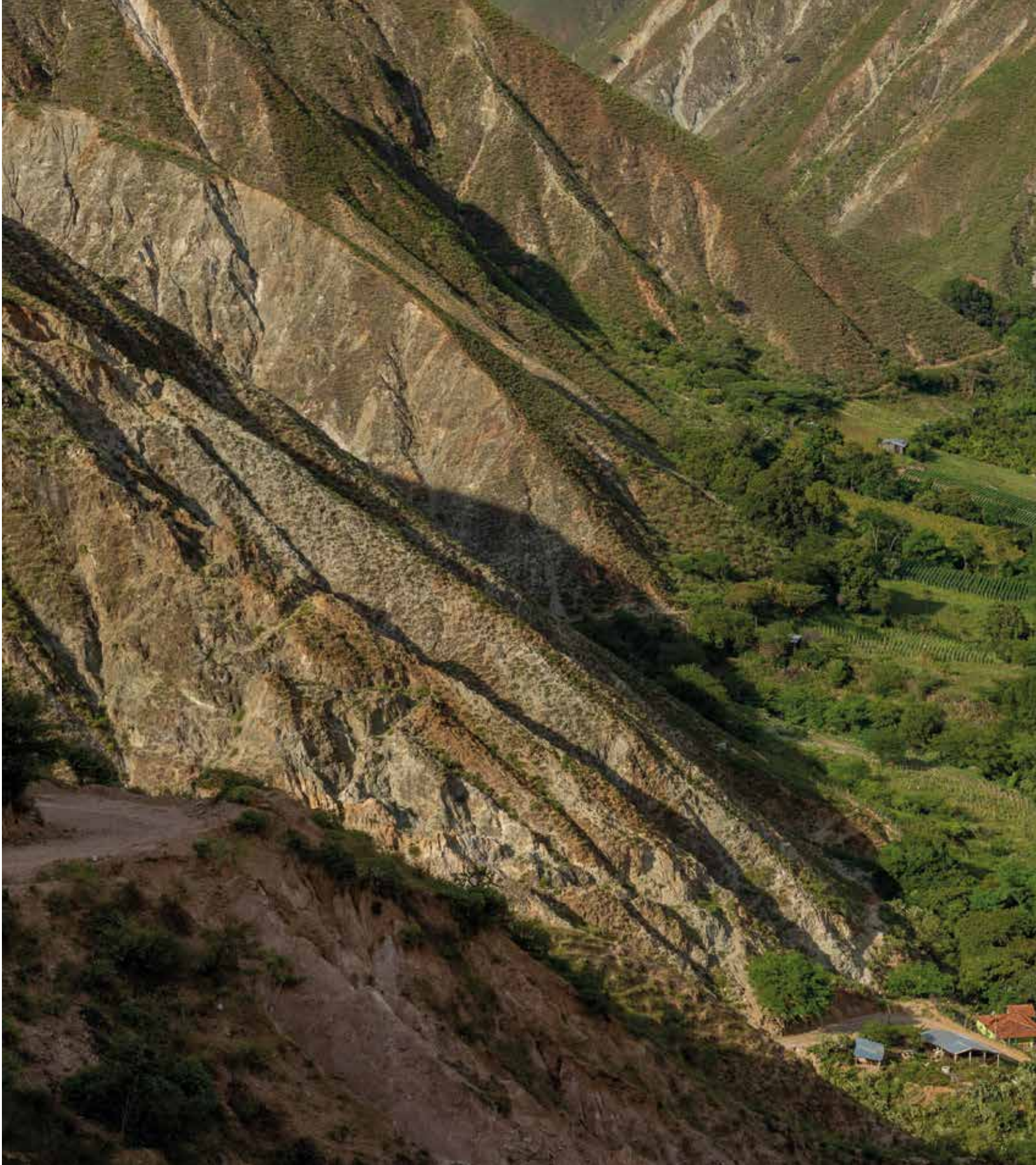


Paisaje en el entorno del paso del río Sogamoso entre Girón y Zapatoca.

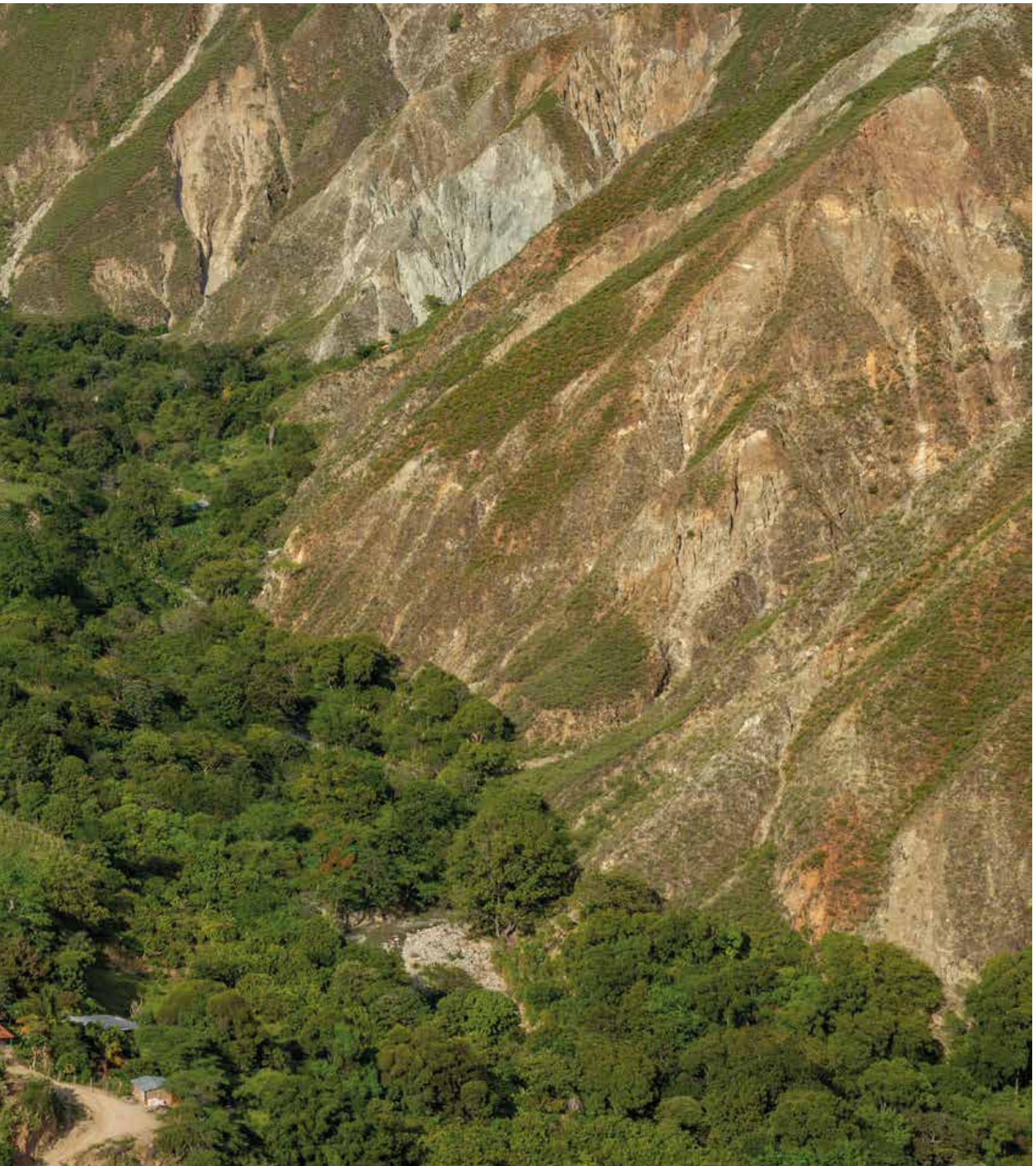
## Referencias bibliográficas

- Caballero, V. M. y Reyes, A. (2015). Primer recorrido geológico vía Zapatoca. Recuperado de [https://www.academia.edu/21419912/PRIMER\\_RECORRIDO\\_GEOLOGICO\\_VIA\\_ZAPATOCA\\_2015](https://www.academia.edu/21419912/PRIMER_RECORRIDO_GEOLOGICO_VIA_ZAPATOCA_2015)
- Castellanos, O.; Ríos, C. y Takasu, A. (2008). A new approach on the tectono-metamorphic mechanisms associated with P-T paths of the Barrovian-type Silgará Formation at the Central Santander Massif, Colombian Andes. *Earth Sciences Research Journal*, 12(2), 125-155. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Diederix, H.; Hernández, C.; Torres, E.; Osorio, J. A. y Botero, P. (2009). Resultados preliminares del primer estudio paleosismológico a lo largo de la falla de Bucaramanga, Colombia. *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 9(2), 18-23.
- Dörr, W.; Grösser, J.; Rodríguez, G. y Kramm, U. (1995). Zircon U-Pb age of the páramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) and its geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(2), 187-194.
- García, C. A.; Ríos, C. A. y Castellanos, O. M. (2005). Medium-pressure metamorphism in the central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes: constraints for a collision model. *Boletín de Geología*, 27(2), 43-68.
- García-Delgado, H.; Machuca, S.; Velandia, F. y Audemard, F. (2020). Along-strike variations in recent tectonic activity in the Santander Massif: New insights on landscape evolution in the Northern Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 98, 102472.
- Goldsmith, R.; Marvin, R. y Mehnert, H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, 750-D: D41-D49.
- Guzmán, G. (1985). Los grifeidos infracretácicos *Aetostreon couloni* y *Ceratostreon boussingaulti*, de la Formación Rosablanca, como indicadores de oscilaciones marinas. *Publicaciones geológicas especiales del Ingeominas*, (16), 1-16.
- Julivert, M. (1958). La morfoestructura de la zona de las mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.). *Boletín de Geología*, (1), 7-43.
- Julivert, M. (1961). Geología de la vertiente W de la Cordillera Oriental en el sector de Bucaramanga (Colombia, Suramérica). *Boletín de Geología*, 8(2), 35-43.
- Julivert, M. (1963). Nuevas observaciones sobre la estratigrafía y tectónica del Cuaternario de los alrededores de Bucaramanga. *Boletín de Geología*, (15), 41-59.
- Julivert, M. y Téllez, N. (1963). Sobre la presencia de fallas de edad precretácica y post-Girón (Jura-triásico) en el flanco W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, (12), 5-17.
- Mantilla, L. C.; García, C. A. y Valencia, V. (2016). Propuesta de escisión de la denominada "Formación Silgará" (Macizo de Santander, Colombia) a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38(1), 33-50.

- Ordóñez, J. (2003). *Petrology and geochemistry of the granitoids at the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes* (tesis de maestría). Shimane University, Matsue, Japan.
- Patarroyo, P. (1997). Barremiano inferior en la base de la Formación Paja, Barichara, Santander, Colombia. *Geología Colombiana*, 22, 135-138.
- Patarroyo-Camargo, G. D.; Patarroyo, P. y Sánchez-Jiménez, C. A. (2009). Un evento de foraminíferos bentónicos en el Barremiano inferior de la Formación Paja (Boyacá, Santander, Colombia). *Memorias del XII Congreso Colombiano de Geología*, Paipa, Colombia.
- Ríos, C. A.; García, C. A. y Takasu, A. (2003). Tectono-metamorphic evolution of the Silgará Formation metamorphic rocks in the southwestern Santander Massif, Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(2), 133-154.
- Ríos, C. A.; Castellanos, O. M. y Takasu, A. (2008). A new interpretation for the garnet zoning in metapelitic rocks of the Silgará Formation, southwestern Santander Massif, Colombia. *Earth Sciences Research Journal*, 12(1), 7-30.
- Téllez, N. (1964). Geología de la Mesa de Barichara. *Boletín de Geología*, (18), 12-21.
- Velandia, F. y Bermúdez, M. A. (2018). The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): insights from geological mapping, stress tensors, and fractal analysis. *Journal of Structural Geology*, 115, 190-207.
- Ward D. E.; Goldsmith, R.; Cruz, B. J. y Restrepo, H. (1973). Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga, y H-13, Pamplona, departamento de Santander. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-132.
- Zafra, D. (2019). *Geospeleological characterization of karst systems in Zapatoca Santander for geoeducation and geoconservation purposes: case of El Nitro and Las Alsacias caves* (tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.



Como una especie de oasis verde, el valle del río Umpalá, un fértil espacio geográfico, se ubica en medio de la augusta aridez del bosque seco del Chicamocha.





Estoraques en cercanías de la vereda Chocoíta del municipio de Girón.



## Paisaje geológico de Los Estoraques en el tramo Bucaramanga-Girón

---

El nombre 'estoraque' proviene de una especie de arbusto de sombra, del que se extrae un bálsamo de propiedades aromáticas y medicinales. En el ámbito geológico, se conocen como estoraques aquellas esculturas naturales que presentan formas de pináculos, conos torrenciales y columnas; algunas de ellas alcanzan más de 10 metros de altura. La formación de los estoraques suele presentarse en terrenos de escasa vegetación, con hierbas y arbustos, donde las condiciones climáticas favorecen que agentes como el agua y el viento, ayudados por la gravedad, causen erosión y formen surcos, cárcavas y empinados valles, hasta conformar un paisaje de aspecto desértico denominado "tierras malas" o *bad lands* (véase la figura 37).

En el tramo Bucaramanga-Girón, los estoraques se forman en los materiales localizados en los niveles superiores del depósito de la meseta de Bucaramanga. Para ilustrar este aspecto mencionado, vale la pena subrayar que la meseta es el resultado del relleno de una fosa o valle profundo con material de gravas, arenas, lodos y arcillas, transportados, en este caso, por el río Suratá desde la alta montaña (páramo de Santurbán).

Para relacionar los estoraques con la meseta de Bucaramanga, vamos a describir cómo se formó el depósito de la meseta, la forma del depósito y el tipo de materiales depositados. La mejor vista de la meseta podemos encontrarla en la vía entre Girón y el aeropuerto Palonegro y en las zonas con buena exposición de estoraques, desplazándonos de norte a sur, por la calle 45, desde la cárcel Modelo hacia la vía a Chimitá; por la vía de Girón a Bucaramanga, hasta el puente El Bueno, y continuando hacia Real de Minas; así como por el Anillo Vial, de Floridablanca a

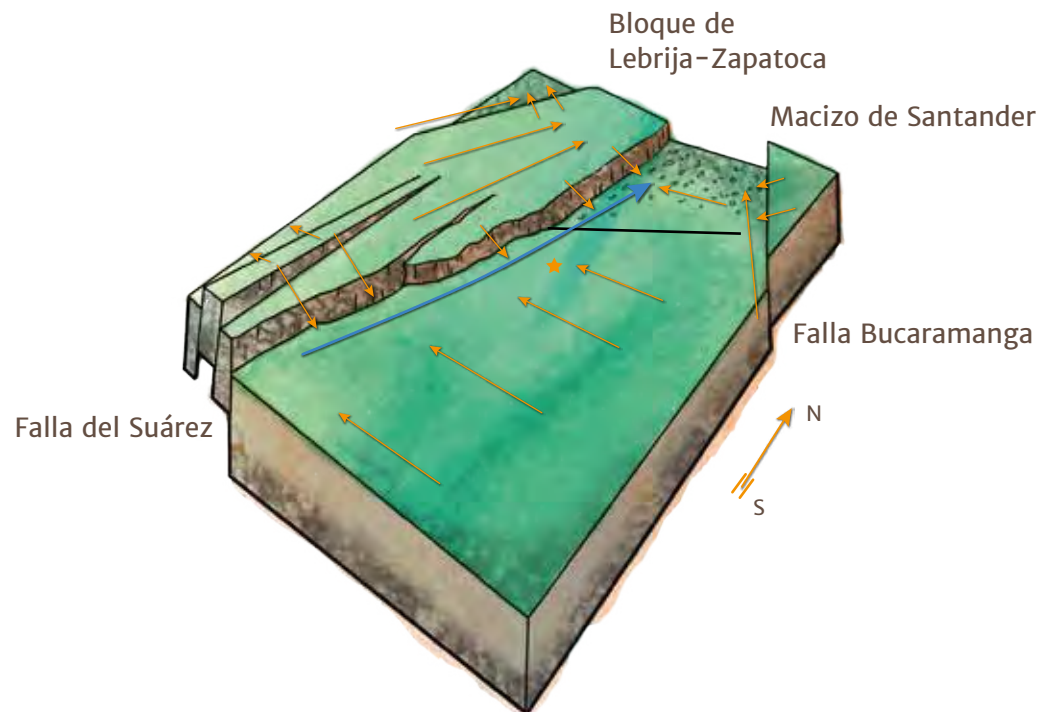




**Figura 37.** Aspecto general de un paisaje de aspecto desértico denominado estoraques (*bad lands*, en inglés).

Girón. Para abordar este tema con mayor profundidad, responderemos una serie de preguntas relacionadas que permitirán aclarar los conocimientos sobre este particular paisaje.

¿Cómo se forman los estoraques? Pues bien, cabe señalar que los estoraques se presentan particularmente hacia la parte superior del depósito de la meseta de Bucaramanga, en el denominado “Miembro Órganos” de la Formación Bucaramanga. El material de este nivel, por su heterogeneidad y poca solidez, se erosiona con cierta facilidad. Así, la lluvia fuerte e intensa destruye prácticamente toda la cohesión del material, y, por ende, el suelo toma una consistencia barrosa y se forman flujos de lodo relativamente rápidos. Posteriormente, el agua torrencial adicional convierte estos materiales en flujos viscosos y plásticos de lodo, que pueden llegar a ser flujos torrenciales o avalanchas (Geotecnología Ltda., 2005). Mediante estos procesos y mecanismos se desarrolla un drenaje denso, dendrítico, de cañadas profundas, acompañadas de geformas de cárcavas y de columnas llamadas estoraques.



**Figura 38.** Esquema ilustrativo de la fosa tectónica en donde se localizan los depósitos de la meseta de Bucaramanga y los paisajes de estoraques. Modificado de Julivert, 1958

¿Cuáles son los procesos que dieron origen al depósito de la meseta de Bucaramanga? Para responder a esta pregunta, vamos a regresar al pasado geológico de la meseta. Imaginémosla entonces como una fosa o un valle ancho y profundo que se cerraba al norte y que estaba ubicado al occidente de la zona montañosa del denominado Macizo de Santander. En adelante, al valle lo llamaremos fosa tectónica, cuyos tres lados eran fallas geológicas (véase la figura 38). El límite occidental corresponde a la falla del Suárez; el límite oriental, a la falla de Bucaramanga; el límite sur, al plano de falla con dirección N70E; es decir, se trata de una falla transversal a la dirección de las fallas del Suárez y de Bucaramanga; y el límite norte, al vértice del triángulo, donde la fosa se acuña por terminación de la falla del Suárez, con dirección norte-nororiente. Además, la falla del Suárez es desplazada por la falla de Bucaramanga, cuya dirección es 'N15-20W'.

Para tener una idea aproximada de cómo ocurrió el relleno de la fosa, visualicemos lo que ocurre en el Cañón del Chicamocha, particularmente, en la población de Cepitá. Allí, las quebradas que vienen de la parte montañosa (Guaca y zonas aledañas) transportan materiales que se descargan en el río Chicamocha. En la desembocadura se presenta un cambio brusco en la pendiente del terreno, que pasa de pendiente de la zona montañosa a la zona plana del cauce del río Chicamocha. En el sitio de quiebre entre las dos pendientes, el material transportado por la quebrada Perchiquez se va depositando en el terreno a su paso por el costado norte de Cepitá hasta terminar en la planicie del río Chicamocha. En esta parte, los sedimentos se distribuyen formando un cuerpo de arenas con forma de delta (semejante al dorso de la mano con los dedos abiertos). Algo similar pudo ocurrir en el relleno de la fosa en Bucaramanga

¿De dónde proviene el material que relleno la fosa tectónica? Este material proviene de la zona de alta montaña (páramo de Santurbán),

y fue transportado por las corrientes o por la red hidrográfica de la cuenca del río Suratá. El espesor de la pila de sedimentos se estima entre 250 y 300 metros. En el depósito de la meseta (abanico aluvial) se pueden distinguir tres partes. La primera es el ápice, el sitio donde el río Suratá descargaba el material en la fosa, ubicado en el límite oriental, y es el punto de inicio de la acumulación de material. A partir de este sitio, los bloques, las gravas y las arenas se fueron acomodando y esparciendo en la zona cercana al ápice, que corresponde a la llamada zona proximal. La segunda es la parte central del abanico, correspondiente a la denominada zona media; y, por último, la zona distal, la parte más alejada del ápice, en donde se acumularon los materiales que tuvieron más transporte dentro de la fosa.

¿Cuánto tiempo tomó rellenar la fosa tectónica? En este punto es necesario pensar geológicamente, actuar como observador y poner la mente en modo de proyección de una película. Hemos descrito que el río Suratá descarga todo el material en un espacio en la fosa de Bucaramanga; pensemos entonces que el río deposita una cantidad muy pequeña de la carga que transporta, de manera que se acumulan tan solo 4 centímetros cada año. Así, sobre este lugar se va levantando una pila de capas que, por encontrarse en la superficie, están sometidas a los procesos de erosión y remoción en masa, entre otros, que destruyen parte del material acumulado; en consecuencia, solo se conserva una lámina de sedimentos de 1 milímetro de espesor, es decir, la pila de capas aumenta su espesor en una tasa de 1 milímetro por año. Si la fosa tenía una profundidad de unos 300 metros, entonces en cuánto tiempo se pudo rellenar por acumulación de 1 milímetro de sedimento por año. La respuesta es 300.000 años, menos de la tercera parte de un millón de años, y en el transcurso de ese tiempo la naturaleza construyó un cuerpo material rocoso con 300 metros de espesor.



Formaciones de tierra en el paisaje del municipio de Girón.



Formaciones de estoraques en cercanías del corregimiento de Provincia, en el municipio de Sabana de Torres.

¿Qué es un millón de años para nosotros los humanos? Para entender los procesos de la naturaleza, tenemos que comprender cómo es que ellos trabajan. Vamos a contextualizar los procesos naturales (o geológicos) en función de dos variables: tiempo y espacio. En cuanto al espacio, tenemos que distinguir el espacio geológico del espacio geográfico. El primero comprende el ambiente, o las condiciones bajo las cuales el proceso actuó, que, en este caso, alude a la sedimentación aluvial de un río en una región continental; mientras que el segundo es la ubicación geográfica del terreno en tiempos pasados (tiempo geológico); por tanto, nos referimos a la paleogeografía, que implica conocer cómo se distribuían los mares y los continentes en el pasado geológico.

La otra variable, el tiempo, desde el punto de vista de los humanos, se mide en unidades de año, meses, días, etc., y se toma el año como unidad de referencia. Así, para entender la magnitud del tiempo geológico, se debe tener

claro que la unidad de referencia es el millón de años; una vez dicho esto, podemos dimensionar mentalmente, por ejemplo, la edad de la Tierra, que tiene 4600 millones de años.

¿Qué dimensiones y características físicas tiene el abanico aluvial de la meseta de Bucaramanga? Desde la zona apical, con una altura de 1000 metros sobre el nivel del mar, el abanico desciende hacia el occidente a una altura de 750 metros sobre el nivel del mar en su parte distal, donde termina contra el escarpe de la falla del río Suárez. El ancho del abanico es mayor que su longitud; el ancho del abanico (en dirección norte-sur) cubre una distancia de cerca de 26 kilómetros, mientras que la distancia longitudinal (en dirección oriente-occidente) varía entre 6 y 14 kilómetros. El espesor de la pila de sedimentos se estima entre 250 y 300 metros; y, con base en dataciones paleomagnéticas, la edad de acumulación de los materiales se estima en menos de 730.000 años. Además, en la secuencia sedimentaria, se



Estoraques sobre la vía Girón-Bucaramanga.

han reconocido cinco horizontes o miembros (Julivert, 1958). El techo de la secuencia de sedimentos corresponde a un nivel de material rojo, denominado miembro 'limos rojos'; concierne a la zona plana del abanico, por lo que se le ha denominado meseta.

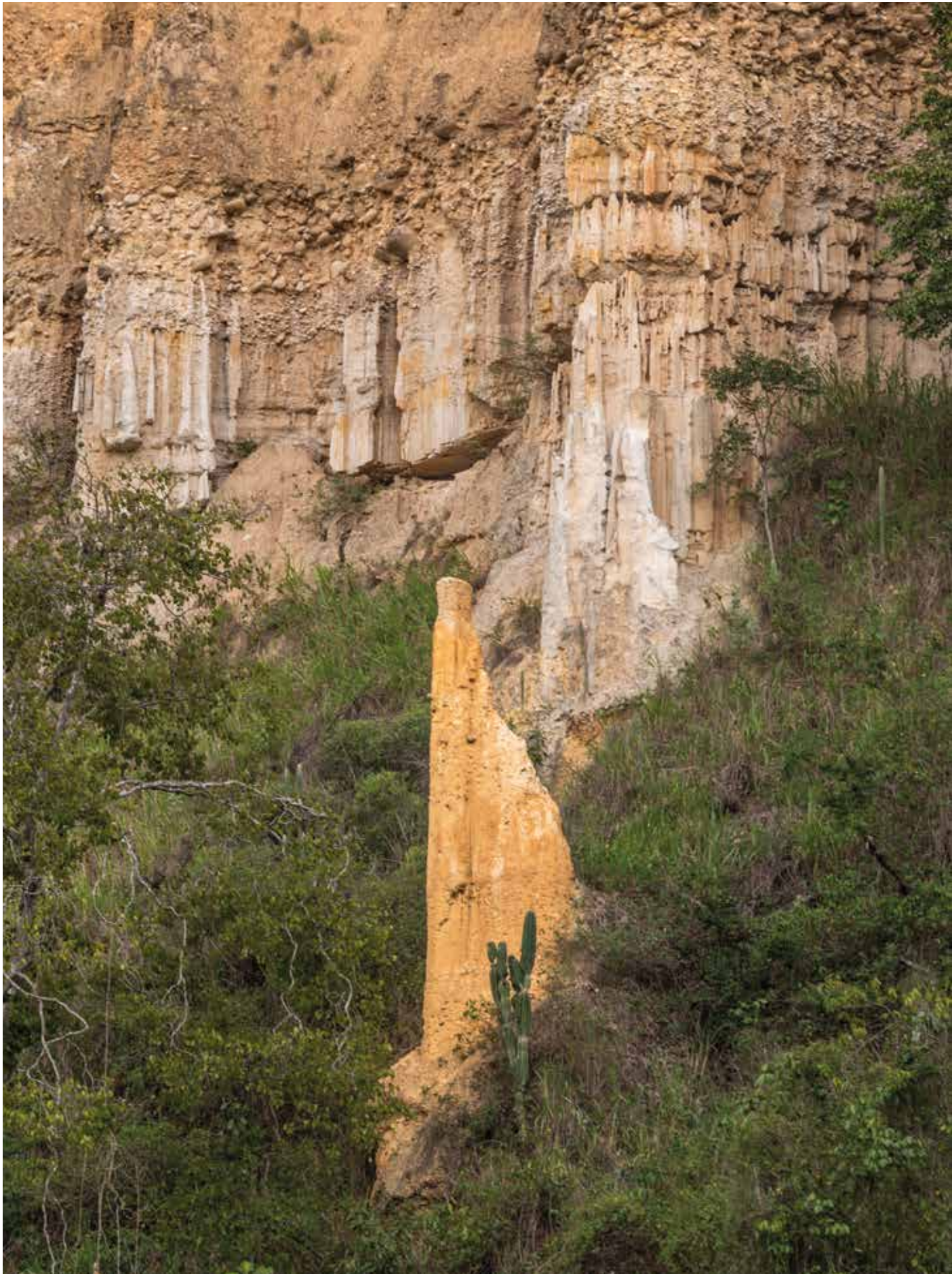
La parte proximal del abanico, que no alcanzó a ser afectada por la erosión regresiva, corresponde a la zona donde se construyeron las ciudades de Bucaramanga y Floridablanca; mientras que, en las partes central y distal del abanico, se ha instalado una red de drenajes profundos, que dan lugar al desarrollo de las tierras malas, con los estoraques, donde se localiza el barrio homónimo, Estoraques, en Bucaramanga. En la terminación norte de la fosa, se observa un escarpe que parece representar coronas de grandes deslizamientos rotacionales, lo que conlleva serias amenazas por remoción en masa, con potencial afectación de las comunidades allí localizadas. La morfoestructura de los rasgos del terreno en el

área metropolitana de Bucaramanga es resultado de la interacción de procesos y, principalmente, de la combinación de movimientos tectónicos y de condiciones paleoclimáticas durante los últimos 750.000 años.

¿Por qué el material del río Suratá ahora es transportado por el río Lebrija? Una vez que la fosa de Bucaramanga se colmató, el río Suratá buscó la manera de seguir descargando su material, y fue la misma naturaleza la que le ofreció una salida: abrir su cauce sobre material rocoso que tuviera menos resistencia a la erosión. La localización de la desembocadura del río Suratá sobre la zona de cizalla de la falla activa de Bucaramanga, cuyo flanco oriental se desplaza hacia el norte, le permitió controlar el curso de su nuevo cauce. Así, a partir del ápice, antiguo sitio de descargue, hoy Morrórico, el río sigue en dirección nor-noroeste, para continuar como río Lebrija, luego de su unión con el Río de Oro.



Estoraques en inmediaciones de la vía hacia Barrancabermeja.



Algunas de las formaciones de estoraques en la Vereda Chocoita del municipio de Girón.





Estoraques en cercanías del municipio de Lebrija.

¿Qué podemos decir de la localización del cauce actual del río Suratá? El sitio donde se localizaba la desembocadura del río Surata y donde descargaba el material de bloques, gravas, arenas y lodos provenientes de la montaña alta, es decir, el ápice del abanico, hoy día corresponde al sitio de Morrórico. La distancia entre Morrórico y el actual cauce del río Suratá es de 2,5 kilómetros, que corresponde al traslado hacia el norte del antiguo cauce del río Suratá. Este desplazamiento se interpreta como el movimiento a lo largo del trazo de la falla de Bucaramanga. Si aceptamos que el bloque oriental del Macizo de Santander se desplazó a una tasa de 5 milímetros por año hacia el norte, esto significa que en un tiempo de 500.000 años el antiguo cauce del río Suratá se desplazó 2,5 kilómetros, hasta el actual sitio.

Con base en los indicios geomorfológicos directos e indirectos, junto con criterios sedimentológicos, es posible señalar que tanto la falla del río Suárez como la falla de Bucaramanga son fallas activas, lo que nos permite sugerir que durante el Pleistoceno tardío ocurrió un evento de activación tectónica que ha desencadenado una serie de procesos cuyos resultados se reflejan en la mayor parte de la actual geografía regional (Ingeominas, 2008).

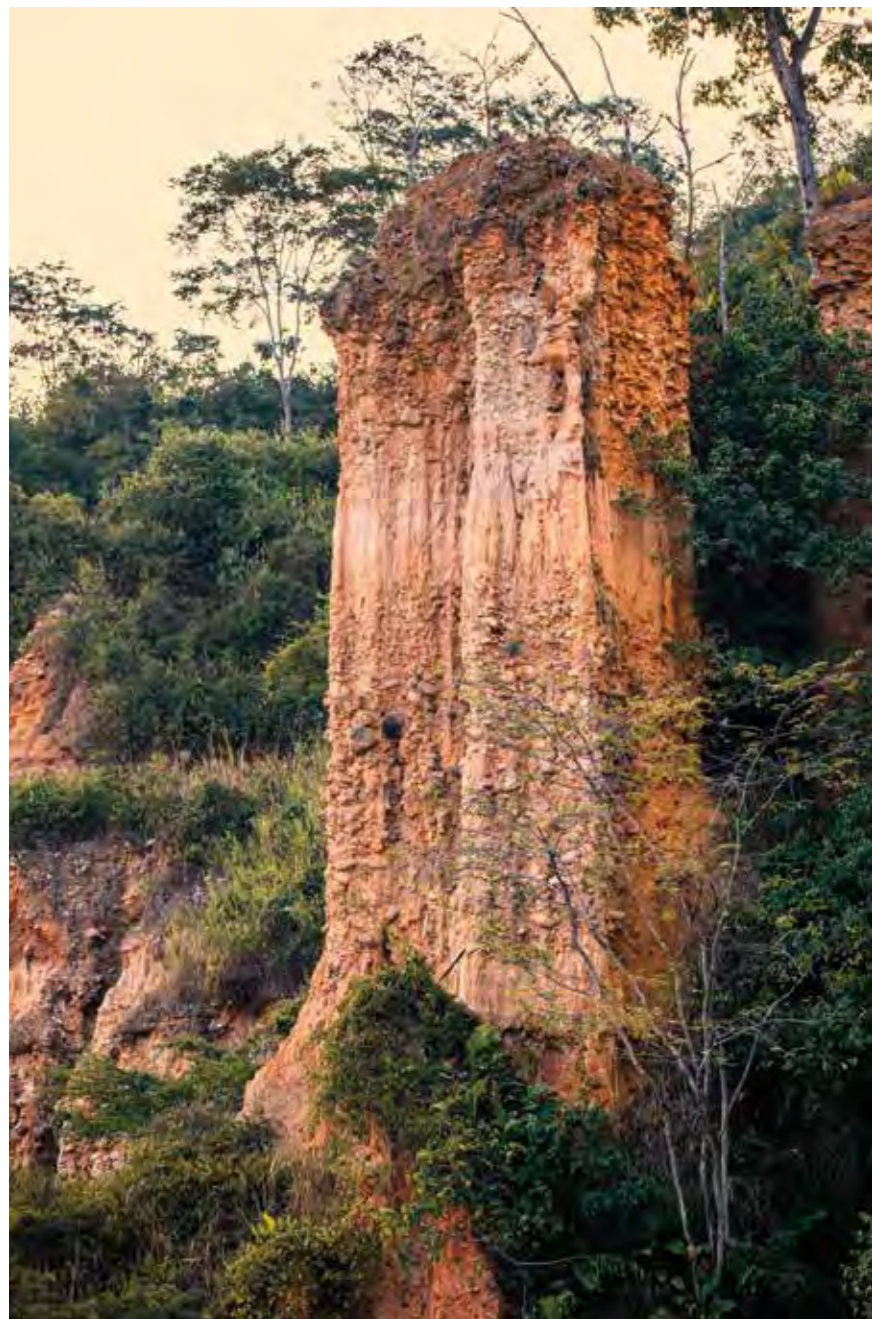
Esta cadena de procesos relacionados indica una fase de aumento en la actividad tectónica durante el Pleistoceno tardío, lo que tendría implicaciones en la amenaza sísmica de la región, situación que amerita una profundización de los estudios sísmicos, neotectónicos, paleosismológicos y geocronológicos en la región nororiente de Colombia.

## Referencias bibliográficas

Geotecnología Ltda. (2005). Estudio geológico geomorfológico, geotécnico y estabilidad de laderas. Recuperado de <https://www.fidubogota.com/wps/wcm/connect/fidubogota/251b8318-7134-4f56-b427-eea095b27142/estudio-geologico-11092012.pdf?MOD=AJPERES>

Instituto Colombiano de Geología y Minería, Ingeominas (2008). Modelo geodinámico del Macizo de Santander. Recuperado de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003002524547/documento/pdf/2105245471101000.pdf>

Julivert, M. (1958). La morfoestructura de la zona de las mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S. A.). *Boletín de Geología*, (1), 7-43.





Formaciones propias de un paisaje pletórico de cuevas en el municipio de El Penón.



## Paisaje kárstico El Peñón – La Paz

---

Partiendo del sitio conocido como Paloblanco, a un costado de la Transversal del Carare, comienza un viaje hacia uno de los paisajes más intrigantes de la geografía santandereana, que para los principiantes en el conocimiento de la geología es como si se tratara del ingreso a uno de esos paisajes prehistóricos donde lo único que haría falta sería la presencia de un gigantesco dinosaurio, al mejor estilo de un parque jurásico.

Esta ruta se compone de varios caminos que conducen a distintas poblaciones de la Provincia de Vélez; no obstante, todas ellas ofrecen un espacio territorial donde predomina el paisaje kárstico. Este espacio tiene cuatro características clave: en primer lugar, la presencia de cavernas, simas, galerías y doninas, entre otros; en segundo lugar, la existencia de procesos de formación de rocas relacionados con la disolución y la celeridad con que se manifiestan; en tercer lugar, los aspectos dinámicos de la circulación de las aguas; y, por último, los aspectos hidrogeológicos asociados a las condiciones morfogenéticas del terreno.

Este territorio que hoy recorreremos adentrándonos en las geografías de los municipios de Bolívar, Sucre, El Peñón, Jesús María, Aguada, La Belleza y Florián, entre otros, es el mejor escenario para observar las diferentes manifestaciones de este paisaje kárstico.

### ¿Cómo se forman las cuevas?

Para que pueda existir un sistema kárstico en rocas calizas, es necesario que haya un macizo rocoso, compacto y resistente que se encuentre fracturado; además, se requiere un gradiente hidráulico que favorezca la infiltración de las aguas superficiales y la circulación de las aguas subterráneas por los conductos kársticos, puesto que no hay que olvidar que el karts es un sistema con una red compleja de drenaje subterráneo.

El proceso de formación del sistema kárstico es el siguiente: primero, el sistema rocoso se fractura por las fuerzas tectónicas que actúan sobre él o por la liberación de la presión litostática. Después, las fisuras creadas de esta manera proporcionan un sistema complejo, inicialmente muy estrecho, de circulación de aguas subterráneas.

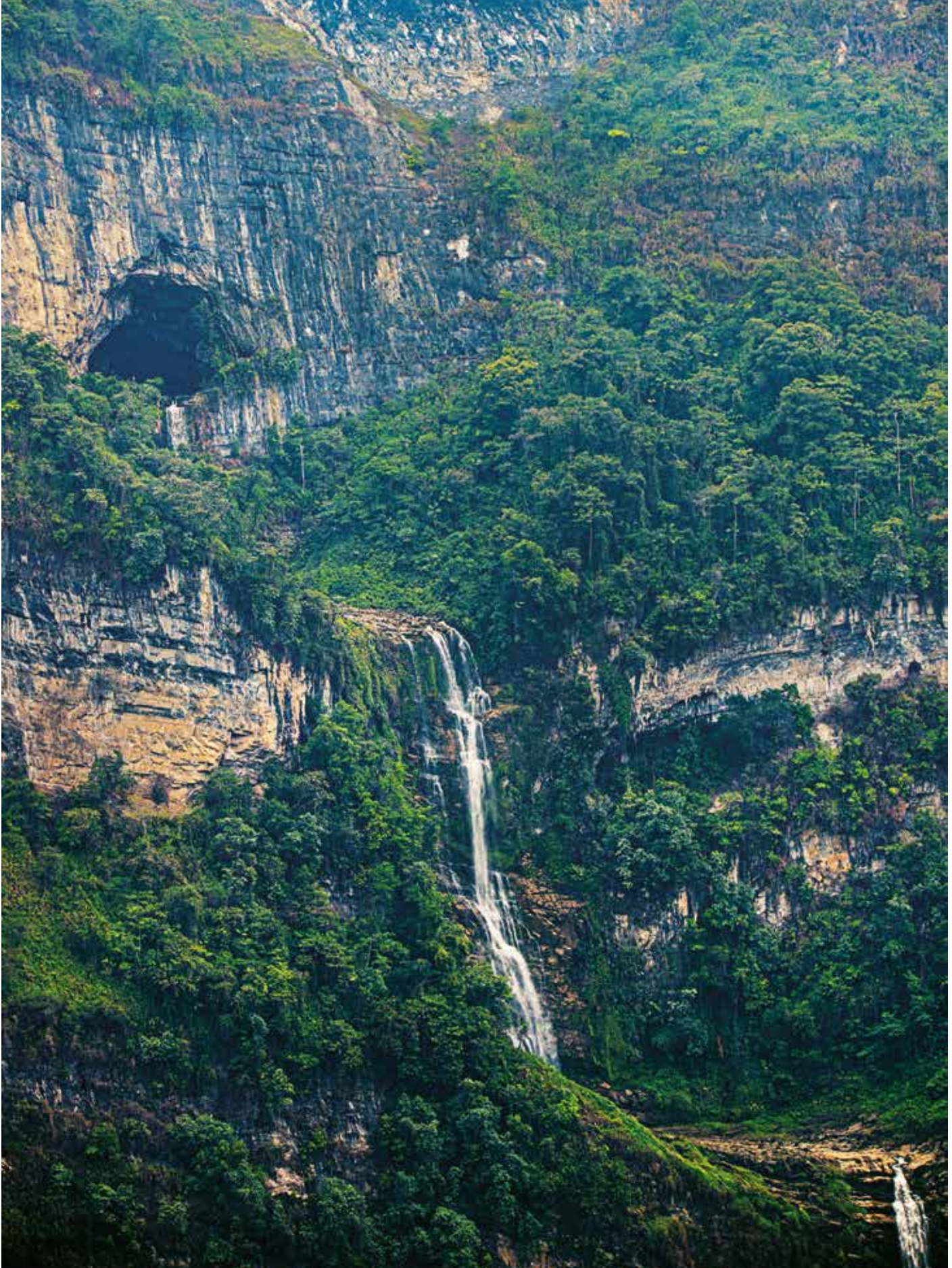


Estructura de un estoraque en otra estructura rocosa en cercanías del municipio de Bolívar.

Si se trata de aguas ácidas, estas van disolviendo paulatinamente el macizo rocoso calcáreo, y van formando conductos y espacios libres de roca cada vez más grandes, donde las aguas circulantes seguirán disolviendo y transportando materiales en solución y fragmentos sólidos liberados durante el proceso. En consecuencia, se incrementa el desarrollo de las cavidades, mediante la creación de pasadizos, galerías y cavernas, todas ellas interconectadas, donde tanto el agua subterránea que circula a través de ellas como la red de conductos y la roca misma que los contiene pasan a ser los constituyentes principales del sistema.

Es importante señalar que más de 90 % de las cavernas del mundo se encuentran en calizas de calcita y de dolomita, con porcentajes de carbonato de calcio de entre 75 y 95 %, y cubren 4 % de las tierras emergidas.

A lo largo del territorio de Santander, se encuentran formaciones y macizos de roca caliza con amplio y abundante desarrollo del sistema kárstico, que se extienden por la parte norte y el centro del departamento. Ese paisaje se encuentra desde la población de Rionegro, y continúa su formación en gran parte del flanco occidental de la Cordillera Oriental, que corresponde principalmente a las formaciones calizas de la edad Cretácea, a la Rosa Blanca de la edad Valanginiano (140 millones de años), al Hauteriviano (130 millones de años) y a la formación denominada Tablazo. Esta última formación corresponde a las edades Aptiano inferior (120 millones de años) y Albia no inferior (115 millones de años), y da lugar a los desarrollos kársticos más conocidos en el departamento, como las cuevas El Molino, en La Paz; La Antigua, en San Gil; El Nitro, en Zapatoca; Los Guácharos, en Mogotes; Los Caracos, El Caracol, Las Sardinas, Las Gallinas y La Tronera, en El Peñón; Los Papagayos, en Bolívar; La Vaca y la del Yeso, en Curití; la muy visitada Cueva del Indio, en Páramo, y la de Los Aviones, en San Vicente de Chucurí.



Salto de la quebrada de Tisquizoque, en la estructura denominada Ventanas, en el municipio de Florián.

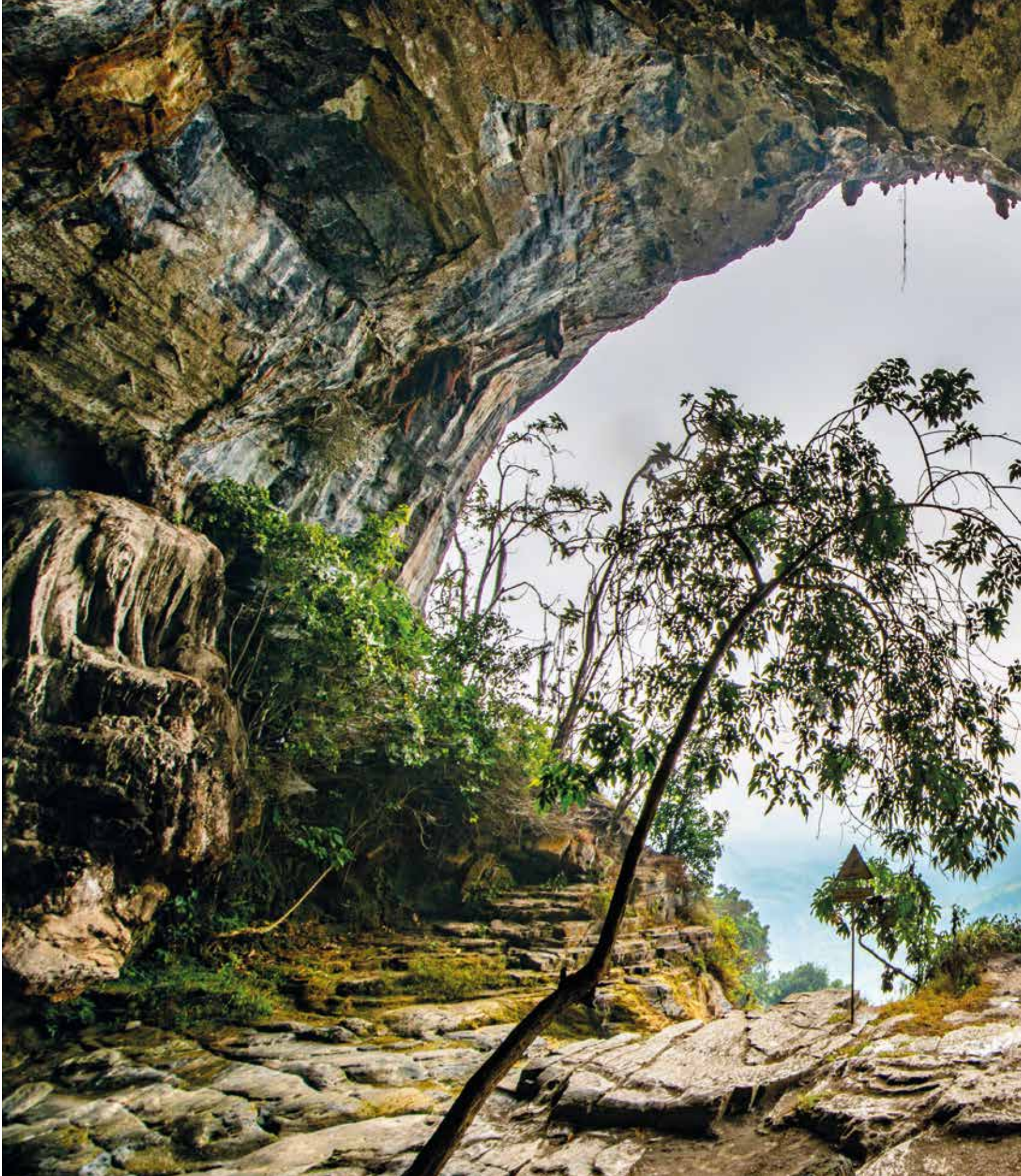


Interior de la cueva de Tisquizoque.

Dentro de las Ventanas de Tisquizoque, un juego visual nos traslada a los capítulos de *Viaje al centro de la Tierra*, con sus paisajes rocosos, abrebocas de un universo por descubrir.







La imponente ventana que se abre en la cueva de Tisquizoque.





Estructura de la tierra en las laderas montañosas de El Peñón.

### Geografías del asombro

En nuestro recorrido, luego de llegar a Bolívar —la capital del requinto, uno de los instrumentos de cuerda de mayor sonoridad y alegría musical—, tomamos camino en busca de los municipios de Sucre y Jesús María, con la meta final de llegar a Florián, donde las Ventanas de Tisquizoque se convierten en el capital turístico del municipio.

El atractivo de las Ventanas de Tisquizoque inicia cuando, por una abertura similar a un portal en el macizo rocoso calizo, ingresan las aguas de la quebrada La Venta, y esta a su paso da origen a una amplia y alta cavidad con desarrollo de un sinnúmero de hermosas estalactitas y estalagmitas. Luego de que estas aguas recorren unos 50 metros, se precipitan desde una “ventana” ubicada al otro lado de la montaña, y, a manera de una esplendorosa e imponente cascada, desciende por tres caídas consecutivas que superan los 120 metros de altura.

Para explicar cómo fue posible la conformación de esta maravilla de la naturaleza, hay que tener en cuenta que en los complejos kársticos existe una génesis simultánea de una estructura subterránea y de una morfología de superficie asociada a ella, que lleva a la desaparición más o menos completa del drenaje superficial.

En otras palabras, la tierra se traga el agua, y esta comienza a tallar el interior de la tierra, generando distintos tipos de formaciones, como la que se evidencia en la caverna descrita en las Ventanas de Tisquizoque.

Tomamos ahora la ruta que nos conduce hacia el más nuevo de los municipios de Santander, El Peñón, que se puede calificar como uno de los destinos obligados para los geólogos que quieran descubrir y estudiar el paisaje kárstico en todo su esplendor. Durante el recorrido, es posible encontrar todas las manifestaciones posibles de los procesos de transformación que definen el relieve kárstico en superficie, o relieve exokárstico. Este tipo de relieve está conformado por estructuras como las dolinas, término de origen esloveno que traduce ‘valle’ o ‘depresión’; simas, aberturas estrechas que comunican la superficie con las galerías subterráneas u hoyos; lapiaces, una especie de surcos paralelos separados por tabiques; poljes, grandes depresiones de miles de hectáreas, de forma alargada y fondo horizontal, limitadas lateralmente por vertientes abruptas; sumideros y ponors, un tipo de aperturas a manera de portales, donde una corriente superficial fluye hacia un sistema de agua subterránea; y, por último, las marmitas de gigante, depresiones de disolución hemisféricas o tazones de tamaños decimétricos.

Como hemos dicho, la oferta de cuevas por descubrir en El Peñón es muy amplia. En esta oportunidad, profundizaremos en la llamada Cueva del Oro. Su nombre proviene de la iridiscencia que producen algunos de los cristales de carbonato que se han formado en sus paredes ante el brillo de las lámparas de luz que llevan los visitantes en su recorrido.

Tras una caminata de unos 30 minutos, desde el casco urbano, se llega al portal de entrada de la cueva, perfectamente mimetizado entre la vegetación circundante. En su interior se encuentra una caverna pequeña y de estrechos pasillos, sin murciélagos como residentes, pero sí un completo, magnífico y deslumbrante desarrollo de estalactitas, estalagmitas y columnas, junto con adornos de microcristales en sus paredes y en su techo, que forman un conjunto armonioso en estos recónditos tesoros ocultos bajo la tierra.

El fenómeno de conformación de estas figuras consiste en un interesante proceso del sistema kárstico, que ocurre cuando las aguas saturadas en cationes de calcio y aniones de bicarbonato se infiltran por grietas y

En la ruta alterna —por cierto, casi en desuso— que une los municipios de Sucre y Jesús María, el paisaje que acompaña al viajero deja atisbar las formaciones kársicas que, aflorando entre los vestigios de lo que fueran las inexpugnables selvas del Carare-Opón, van dando idea de los próximos encuentros en este territorio pletórico de sorpresas.





Formaciones de floraciones rocosas en el paisaje de El Peñón.

En algunos lugares se observan grandes depresiones que dan cuenta de un proceso en formación de nuevas cuevas; en otros lugares, estoraques gigantes que afloran sobre la superficie custodian el paisaje circundante.



Estoraques en piedra en la zona de El Peñón.

fisuras delgadas del techo, y escurren tanto por la superficie como por las paredes y el piso de las cavernas y galerías. Luego, por evaporación del agua, se produce la precipitación de delgadas láminas de microcristales de carbonato que cubren tanto techos como paredes y pisos de las cavernas.

También ocurre que la acumulación de gotas por precipitación de las aguas saturadas en cationes de calcio y aniones de bicarbonato, desde el techo de la caverna hacia el suelo, va formando capas concéntricas de microcristales que forman estructuras cónicas colgantes en el techo, conocidas como estalactitas. Asimismo, es posible que estas formaciones surjan en sentido inverso, es decir, que crezcan desde el piso hacia el techo; en ese caso, reciben el nombre de estalagmitas. Cuando estas formaciones de crecimiento descendente y ascendente logran encontrarse entre sí, forman una columna de gran belleza natural que da lugar al paisaje interior de nuestro planeta.



Dentro de las cuevas, encuentros permanentes con salones donde las estalactitas y estalagmitas adornan el escenario. Por allí discurren fuentes de agua cristalina, donde es posible ver asomándose peces de transparente presencia.



Cueva del Oro en el municipio de El Peñón.

## El Hoyo del Aire

Para terminar el recorrido por este territorio único, llegamos a las inmediaciones del municipio de La Paz, donde a partir de un desvío por un tramo muy bien atendido con placa-huella se arriba al aclamado Hoyo del Aire, denominación que obedece a las fuertes corrientes de viento que se forman en horas vespertinas.

Con sus 172 metros de diámetro y una profundidad de 160 metros, se estima que su conformación pudo ser el resultado de una sima o dolina de colapso, es decir, una depresión de hundimiento vertical abierto, como de hecho se puede determinar por la presencia en ese lugar de manifestaciones menores en bóvedas y dolinas. Este fenómeno puede evidenciarse en otros lugares de Santander, como en el Hoyo

de los Pájaros en Mogotes, resguardo de los llamados guácharos, aves de comportamiento nocturno que anidan en los estimados 98 metros de profundidad de esta concavidad natural.

El Hoyo del Aire ha sido, desde tiempo atrás, un ícono de los paceños, pues muchas son las historias que se han tejido sobre él. Así, por ejemplo, para algunos, el cráter era producto de un meteorito que había impactado en este lugar; y, para otros, el lugar era el escenario de cruentas narraciones que hablaban de él como un cementerio abierto donde iban a parar las víctimas tanto de la violencia política de los años cincuenta y sesenta como de la guerra entre miembros de las Farc y de los paramilitares que habían llegado a “pacificar” la región en la década de los noventa.



El impresionante Hoyo del Aire, en el municipio de La Paz.



Estructura para la práctica del descenso controlado en el Hoyo del Aire.





El Hoyo del Aire en una de las escarpas desde donde se divisa la impresionante huella de este espectáculo geológico de Santander.





Paso del río Chicamocha en el valle que se conforma en cercanías del municipio de Capitanejo.



## Paisajes geológicos de Málaga – San José de Miranda – Capitanejo

---

Al suroccidente de Santander, en la Provincia de García Rovira, el paisaje está dominado por las rocas sedimentarias del Cretácico y el Paleógeno. En Colombia, el Cretácico representa un ambiente marino, conformado por acumulación de sedimentos en un mar que va de nivel somero a nivel profundo, y que, luego, hacia el Paleógeno disminuye de nuevo su nivel, de modo que se presentan condiciones transicionales de playas, lagunas costeras, ciénagas, pantanos y desembocaduras de grandes ríos en deltas. Estas condiciones se dieron en la cuenca del Cocuy, cuyas rocas se exponen hoy hacia el borde suroriental del Macizo de Santander, donde afloran rocas antiguas del basamento cristalino (rocas ígneas y metamórficas) de la Cordillera Oriental.

Desde esta zona, que muestra la intensa actividad tectónica que implicó el levantamiento de rocas formadas en el mar hasta las mayores altitudes de la cordillera en la Sierra Nevada del Cocuy o Güicán, se formaron espectaculares paisajes de pliegues y fallas geológicas. El recorrido por Málaga y Capitanejo, vía a El Cocuy, constituye una de las zonas más apropiadas, y, al mismo tiempo, complejas, para la enseñanza de la geología en Colombia. Su clima semiárido permite observar y estudiar la formación de abundantes pliegues asociados con fallas geológicas, junto con otras estructuras menores, como venas, diaclasas y distintos tipos de fallas locales. Sin embargo, resulta complejo entender los procesos de formación de estas estructuras, debido a la densidad de geoformas, a la dificultad de acceso a los espacios adecuados para tomar medidas con brújula y observar directamente las distintas unidades de rocas y, además, a la cantidad de material removido y acumulado en depósitos cuaternarios (coluviones, taludes, aluviales levantados) que han cubierto gran parte del paisaje, con pliegues y fallas incluidas.

El recorrido por las márgenes de los ríos Servitá, Chicamocha y Nevado permite observar pliegues anticlinales y sinclinales con distintas formas y tamaños, desde pliegues regionales abiertos hasta locales y cerrados. Apenas llegando a San José de Miranda, desde Málaga, se puede apreciar un pliegue sinclinal en cuyo núcleo estructural está ubicada la población, y en cuyo flanco occidental se presentó por muchos años un deslizamiento activo que cerraba continuamente la vía. Hoy, afortunadamente, ya se ha solucionado el problema geotécnico.

A partir de los pliegues que aparecen en la secuencia de unidades marinas del Cretácico en la vía de Capitanejo a El Cocuy, es posible detectar las fallas que desde las profundidades dieron lugar a estas geoformas. Al mismo tiempo, y de manera más detallada, se pueden observar venas de calcita que implican fracturas abiertas que permiten el tránsito de fluidos mineralizantes por estos espacios. En otros afloramientos es posible ver estrías de fallas formadas por la fricción y el movimiento de bloques a lo largo de estas fracturas. Este tipo de formas al nivel de la roca misma son importantes para entender cómo se movieron las fallas y bloques que ayudaron al levantamiento de la cordillera, seguramente con terremotos involucrados.

Es posible realizar un interesante recorrido por la geología de Santander entrando al corregimiento de Ricaurte en el municipio de San Joaquín. Este lugar tiene un acceso, por demás, bastante complicado, pues implica llegar primero al municipio de Covarachía en Boyacá, para luego descender en busca del mencionado lugar. En el trayecto son abundantes los movimientos en masa de deslizamientos, derrumbes o caídas de roca, pero también es posible observar excelentes afloramientos de rocas marinas del Cretácico,

así como rocas sedimentarias y metamórficas del Paleozoico (Formación Floresta) y rocas de origen ígneo.

Además de las rocas propiamente dichas, y de los paisajes de los ríos Chicamocha y Servitá en la zona de Capitanejo, el mayor interés es llegar a Ricaurte, donde el río Chicamocha muestra sus espectaculares geoformas, con un clima semidesértico y total control de su cauce por la falla de Bucaramanga. Esta estructura regional presenta un amplio corredor o zona de daño, desde el norte de Bucaramanga hasta Ricaurte, donde se pueden observar lomos de falla de diversos tamaños y de forma alargada en la misma dirección del río y de la falla, así como zonas anchas de la llanura aluvial, también controladas por la estructura regional. Es en esta localidad de Ricaurte donde la falla de Bucaramanga se ramifica para seguir hacia el sur hasta el municipio de Paz de Río (Boyacá).

Desde aquí el trazo de la falla diverge, y se presentan al menos tres trazos de falla que provocan el levantamiento de la cordillera hasta la zona de páramos en Boyacá. En Ricaurte, uno de los trazos de falla formó un lomo que represó al río Chicamocha hace aproximadamente 400.000 años; el resultado fue la formación de un lago cuya evidencia existe en los depósitos del Cuaternario en Capitanejo (Santander) y Soatá (Boyacá), donde además se han encontrado caracoles que les sirvieron a paleontólogos para calcular la edad de este cuerpo de agua hoy desaparecido.



Paisaje propio de la Provincia de García Rovira sobre la Cordillera Oriental.



Paso del río Chicamocha en cercanías del municipio de Molagavita.



## **Paisajes geológicos de García Rovira (Málaga – Molagavita – San Andrés – Guaca)**

---

Los paisajes de la Provincia de García Rovira son variados, con distintos tipos de rocas y diferencias en el clima. Inicialmente afloran rocas Cretácicas de origen marino, hacia el Alto de Málaga donde se observan escarpes en areniscas y calizas.

El recorrido desde Málaga transcurre por lodolitas con excelentes contenidos de materia orgánica que favorecen la existencia de suelos fértiles para una intensa actividad agropecuaria. En contraste, es evidente la remoción en masa con zonas de reptación (movimiento lento del terreno) y deslizamientos, comunes en este tipo de roca blanda, donde el agua sin control puede formar zonas pantanosas e infiltrarse muy lentamente hasta facilitar el desplazamiento del terreno a nivel superficial.





La apropiación del paisaje a partir del minifundio y los pequeños cultivos de ladera forma parte esencial del paisaje de la Provincia de García Rovira.



Diferentes vistas del paisaje del Chicamocha en toda la región de García Rovira.

En el recorrido de Molagavita a San Andrés se encuentran rocas de distinto grado de metamorfismo, desde el grado bajo, con pizarras que apenas generan una leve foliación (Formación Floresta), hasta los gneises de origen ígneo, con mejor definición en la reorientación y la formación de minerales. En el trayecto hasta la Laguna de Ortices, se observa el paisaje característico del río Chicamocha, controlado por el trazo de la falla de Bucaramanga, con la roca al desnudo por la intensa actividad erosiva del Cuaternario, y con un importante aporte de material a las pequeñas corrientes que llegan al río y que conforman conos de deyección y abanicos aluviales. La abundancia de material fragmentado disponible para la erosión tiene origen en la intensa actividad de fracturamiento, asociada a la actividad reciente de la falla. La Laguna de Ortices se encuentra sobre rocas ígneas de cristales gruesos en un bloque de terreno que descendió por la interacción de fallas menores relacionadas con las fallas de Bucaramanga y Guaca.



Pequeñas corrientes de agua van arañando la tierra, calando y dibujando la estructura del paisaje del Chicamocha, hasta que desaparecen durante la temporada seca.





Formaciones geológicas sobre las montañas que bordean el paso del río Nevado por Macaravita.





Paso del río Nevado, que baja desde la cadena montañosa de la serranía de Guicán.



El paisaje predominante del Chicamocha, conformado por faldas y laderas propicia escorrentías que van tallando la montaña en una estructura propia que obnubila la mirada.

Después de transitar las rocas ígneas y metamórficas se encuentra nuevamente el paisaje de rocas sedimentarias del Cretácico a lo largo de la margen derecha del río Guaca, en los municipios de San Andrés y Guaca. Aunque se pueden observar algunos pequeños pliegues hacia el sur de San Andrés, predomina una constante inclinación de los estratos hacia el oriente con una dirección general o rumbo norte-sur. En la zona predominan rocas resistentes, como areniscas y calizas, que configuran escarpes: paisaje predominante en este valle. También se observan depósitos, como talus y coluviones, a lo largo de los escarpes y sobre las rocas que cubren el contacto entre las más resistentes y las relativamente blandas hacia la parte baja del valle.

Hacia Guaca también son notorios algunos abanicos aluviales, que evidencian la actividad erosiva de las corrientes que bajan del páramo de Listará, ubicado al oriente de estos municipios. El mismo río Guaca (también conocido como Cámara o Colorado) presenta gran cantidad de material de arrastre proveniente del páramo de Berlín o de la parte sur del complejo del páramo de Santurbán.



Valle del río Mogotes, en el municipio del mismo nombre.

## Paisajes geológicos del área de Zapatoca, Galán, Simacota, Contratación, Güepsa y Oiba

---

Los municipios de Zapatoca, Galán, Simacota, Contratación, Oiba y Güepsa, que conforman un corredor a través de las provincias de Yariguíes, Comunera y de Vélez, tienen en común que se encuentran en la parte central del departamento de Santander y en la parte axial de la Cordillera Oriental colombiana. Estos municipios están relacionados con cuatro áreas geológicas importantes e imponentes, como el parque natural serranía anticlinal de Yariguíes al occidente, la fastuosa falla del Suárez, la región sinclinal central y el anticlinal de Cerro Negro hacia el oriente (véase la figura 39).

El parque natural serranía anticlinal de Yariguíes, cuyo nombre deriva de sus antiguos habitantes ancestrales, los indígenas yariguíes, es conocido también como serranía de los Cobardes o serranía de los Yariguíes, y, en el ámbito de la geología, como el anticlinal de Los Cobardes. Este territorio corresponde a un alto estructural anticlinal de alrededor de 500.000 hectáreas, con pintorescos y exóticos paisajes de bosques primarios, en donde habita una importante biodiversidad de flora y fauna, en especial de aves. La serranía de los Yariguíes conforma una zona montañosa de cañones profundos y escarpados, con pendientes que varían entre 25° y 45°, y elevaciones que alcanzan los 3000 metros sobre el nivel del mar, que dan lugar a diferentes ecosistemas, como páramos, subpáramos, bosques andinos, bosques subandinos y bosques húmedos tropicales. Las fallas de El Carmen y de Suárez se convierten en sus límites entre oriente y occidente (Royero y Clavijo, 2001).





**Figura 39.** Esquema geológico y estructural del área de Zapatoca, Galán, Simacota, Contratación, Oiba y Güepsa. Tomado parcialmente de Royero y Vargas (1999) y Pulido (1985 a y b)

La falla del Suárez se extiende con una dirección N20°E y una longitud de 140 kilómetros, desde el sitio conocido como estación Las Bocas, ubicada 5 kilómetros al norte de Bucaramanga, en el punto que coincide con el paso de la carretera que conduce de Güepsa a Chipatá, donde además se pierde la morfología característica de la falla.

Se trata de una falla de rumbo sinistral con una componente vertical importante (Royero y Clavijo, 2001). Su desplazamiento vertical de unos 600 metros se puede observar en el mirador Chocó (vía de Girón a Zapatoca), a

la altura del nuevo puente Gómez Ortiz (vía de Bucaramanga a Zapatoca). La falla del Suárez presenta una expresión geográfica y morfológica imponente, que limita al oriente tanto con la serranía anticlinal de los Yariguíes como con las mesas sinclinales de Zapatoca y Lebrija; sus características definen un trazo recto que coincide principalmente con el curso del río Suárez y un escarpe fuerte de tipo pared que se observa en todo su recorrido, y, especialmente, desde Bucaramanga, cuando se mira al occidente, es decir, hacia donde está ubicado el Aeropuerto Internacional Palonegro.



Zona montañosa de la serranía de los Yariguies, cerca del municipio de Carmen del Chucurí.



Quebrada Las Cruces a su paso por el municipio de San Vicente.

La falla del Suárez en el Cañón del Chicamocha, a la altura de la mesa sinclinal de Zapatoca, se caracteriza por su morfología grandiosa, que complementa la del cañón, y de la cual es uno de sus elementos más importantes. Una vista imperdible se puede lograr desde el mirador de Zapatoca en la vía que une la población de Zapatoca y la mina de yeso El Platanalito.

La región central, que comprende hacia su parte más norte lo que se conoce como la región de mesas y cuevas, se compone de las mesas sinclinales de Zapatoca y de Barichara, superficies planas, amplias y largas. Estas mesas terminan lateralmente en escarpes fuertes que forman un sinnúmero de miradores muy visitados por turistas, desde donde se pueden observar los paisajes fastuosos que incluyen la serranía de los Yariguíes, la falla del Suárez, las demás mesas sinclinales y las poblaciones vecinas. La parte más al sur de esta región conforma una estructura sinclinal, cuyo principal componente es el sinclinal de Suaita-Chima, caracterizado por suaves pendientes menores de  $25^\circ$  con escasos escarpes. El anticlinal de Cerro Negro, al oriente de la región, tiene una longitud de 30 kilómetros, y presenta pendientes suaves menores de  $25^\circ$  con escasos escarpes.

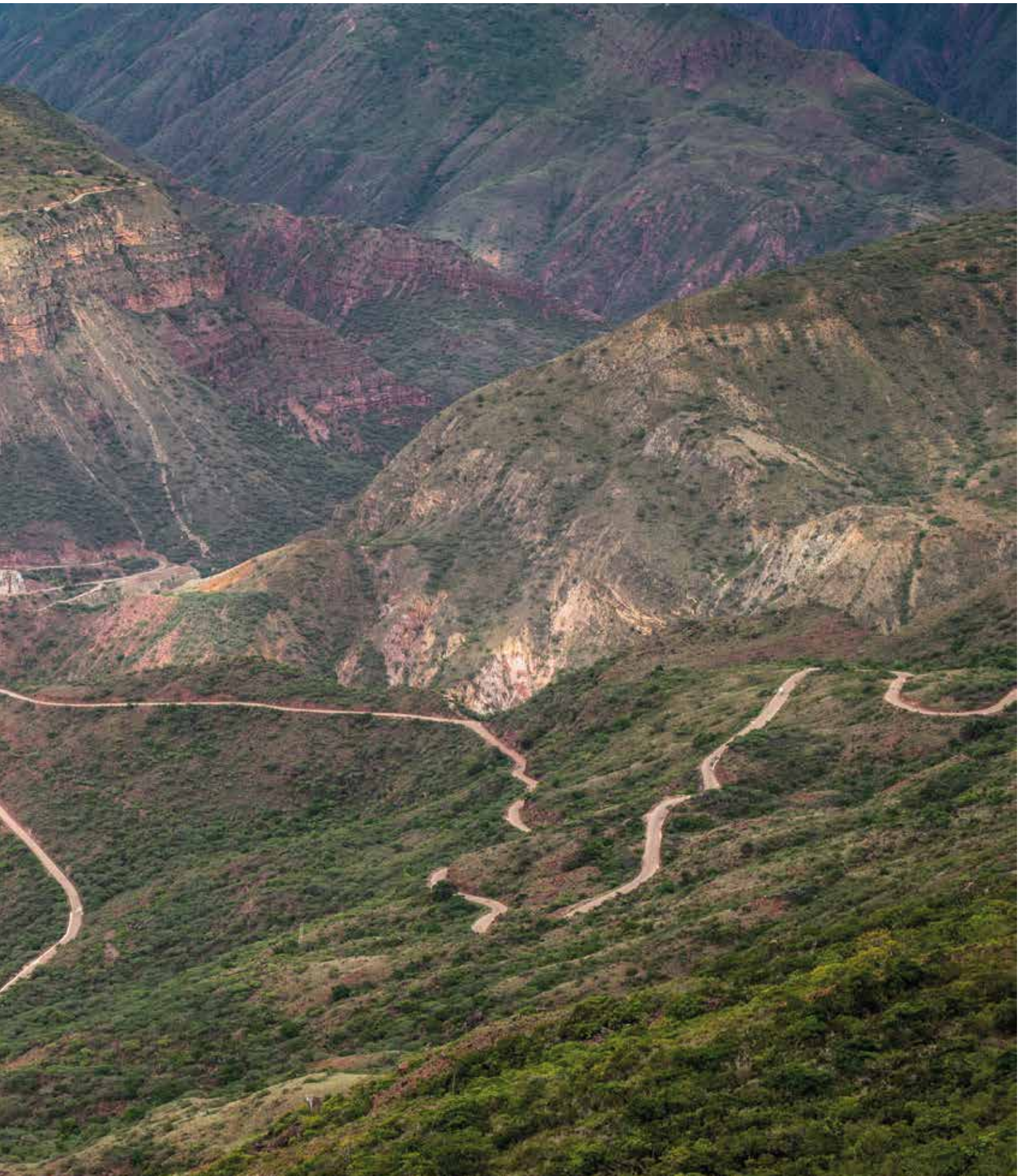
El principal recurso minero de la región central es el yeso de la base de la Formación Rosa Blanca, en las cercanías de la confluencia de los ríos Chicamocha y Suárez, que comprometen los municipios de Los Santos, Villa Nueva y Zapatoca. También se encuentra barita, derivada de la mineralización en forma de venas y filones relacionados con rocas sedimentarias en la vereda Amarillo, en el municipio de la Paz, y en algunas explotaciones esporádicas en Zapatoca (Royero y Clavijo, 2001). Se reportan, igualmente, minas pequeñas y esporádicas de barita en Aguada. En la región de Oiba, Charalá y Gámbita se registran explotaciones de caolín y uranio, principalmente en las areniscas de la Formación Girón en la serranía de los Yariguíes, entre Contratación y Zapatoca.

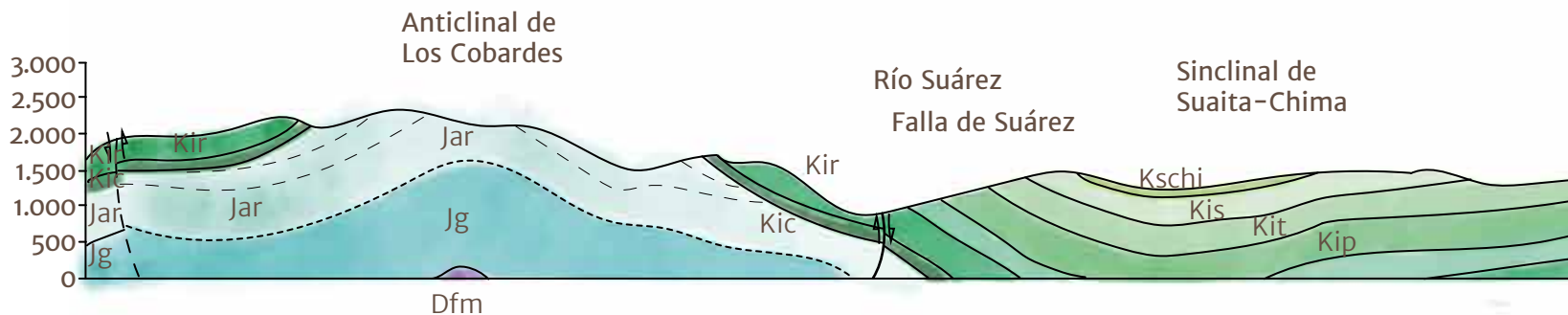
### **Lugares de interés**

La cabecera municipal de Zapatoca se encuentra localizada en la Mesa de Zapatoca, sobre rocas de la Formación Rosa Blanca del Cretácico inferior. Los sitios de interés por su belleza son el mirador del Cañón del Chicamocha, la Cueva del Nitro y los caminos de Lengerke (Zapatoca).



Trazado de la vía entre Girón y Zapatoca al paso del valle del río Sogamoso.





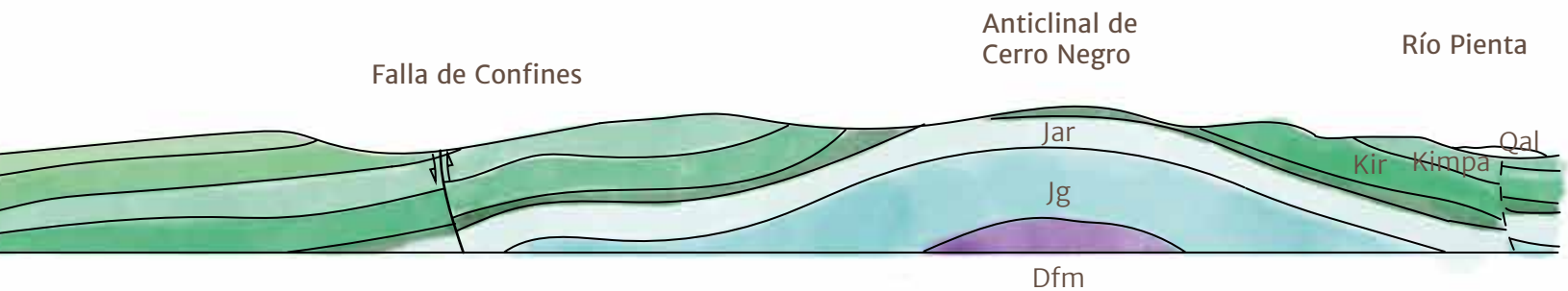
Las poblaciones de Galán y Simacota se encuentran localizadas en el contacto geológico entre la serranía de los Yariguíes y las rocas del Cretácico, cerca del plano de la falla del río Suárez y, particularmente, sobre las rocas de la Formación Paja (Pulido, 1985).

Por encontrarse a una altura superior a la de su entorno, Galán es, en general, un mirador desde donde se puede ver, al occidente la gran pared que forma la falla del Suárez y la serranía de los Yariguíes. Las poblaciones de Contratación y Guadalupe se encuentran localizadas en la serranía de los Yariguíes, sobre la parte axial del anticlinal de Yariguíes y, particularmente, sobre las areniscas de cuarzo. Estas areniscas están intercaladas con limolitas rojizas de la Formación Arcabuco (Pulido, 1985), y conforman una de las entradas a la parte menos poblada y más conservada de la serranía de los Yariguíes.

La población de Güepsa se encuentra dentro del bloque sinclinal al oriente de la falla del Suárez y, específicamente, sobre las rocas de la Formación Simití; al igual que Galán, Güepsa es un mirador natural desde donde se puede ver, al occidente, la serranía de los Yariguíes y, al oriente, la zona central ya referida.

La población de Oiba se encuentra en la parte occidental del anticlinal de Oiba, y, particularmente, sobre las arcillolitas negras de la Formación Paja. Es la entrada principal a la región del anticlinal de Cerro Negro al oriente (véase la figura 40), y es una región principalmente agrícola y ganadera de gran proyección.

Una de las más grandes riquezas de esta región es el registro fósil, presente sobre todo en las rocas de edad Cretácea y en las formaciones Cumbre, Rosa Blanca, Paja, Tablazo, Simití y La Luna. Se ha reportado la existencia de un sinnúmero de fósiles de bivalvos (*Mollusca*) marinos



**Figura 40.** Corte geológico con las tres más importantes estructuras geológicas de la región central del departamento de Santander: el anticlinal de Yariguíes (de Los Cobardes) al occidente, el sinclinal central (Suaita-Chima) y el anticlinal de Cerro Negro al oriente. Formaciones Floresta (Dfm), Girón (Jg), Arcabuco (Jar), Cumbre (Kic), Rosa Blanca (Kir), miembro arenoso Paja (Kimpa), miembro arcilloso Paja (Kip), Tablazo (Kit), Simití (Kis), cuaternario aluvial (Qal). Tomado y modificado de Pulido (1985b)



Explotación de las minas de yeso en el municipio de Los Santos.

en el Cretáceo inferior de esta región (p. ej.: *Cucullae gabrielis*, *Pina robinaldina*, *Ceratostreon boussingaulti*; Camacho, 1969; Guzmán, 1985), especies comunes de Perú, Colombia, Venezuela y Brasil, cuya presencia indica que en su época predominaba el clima tropical. También se han hallado equinodermos fósiles típicamente marinos; cefalópodos (*Nautilida*) del Cretáceo inferior (*Cymatoceras colombiana*, amonitas; Camacho, 1969); foraminíferos bentónicos marinos y reptiles marinos del Cretáceo en la Formación Rosa Blanca (Páramo, 2015), tales como tortugas (*Testudines*, *Notoemys zapatocaensis*; Cadena y Gaffney, 2005; Cadena et al., 2013); *Podocnemidoidea* (indeterminado), *Caretta caretta* (Cadena, 2011); ictiosaurios (*Ichthyosauria*) y otras especies de vértebras desarticuladas (Guzmán, 1985).





Paisaje verde de la región de Yariguies en cercanías de Zapatoca.

## Referencias bibliográficas

- Cadena, E. A. (2011). Potential earliest record of Podocnemidoid Turtles from the Early Cretaceous (Valanginian) of Colombia. *Journal of Paleontology*, 85(5), 877–881.
- Cadena, E. A. y Gaffney, E. S. (2005). Notoemys zapatocaensis, a new side-necked turtle (Pleurodira, Platycheilyidae) from the Early Cretaceous of Colombia. *American Museum Novitates*, (3470), 1–19.
- Cadena, E. A.; Jaramillo, C. A. y Bloch, J. I. (2013). New material of the Platycheilyid turtle Notoemys zapatocaensis from the Early Cretaceous of Colombia; implications for understanding Pleurodira evolution. En D. B. Brinkman; P. A. Holroyd y J. D. Gardner (Eds.), *Morphology and evolution of turtles, Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology* (pp. 105–120). Dordrecht: Springer.
- Camacho, O. (1969). *Invertebrados fósiles*. Buenos Aires: Eudeba.
- Cruz Guevara, L. E.; Jerez Jaimes, J. H.; Narváez Parra, E. X. y Franco Blanco, R. A. (2001). Distribución espacial y relación entre organismos fósiles. Breve síntesis paleoecológica de *Toxaster colombianus* y *Thalassinoides*. *Boletín de Geología*, 23(38), 21–27.
- Forero-Ortega, A.J., Velandia, F., Barragan-Coy, E.K., (2020). Estilos estructurales y tensores de esfuerzo hacia el suroriente del Macizo de Santander (Colombia). *Bol. Geol.* 42 (2), 129–145.

Guzmán, G. (1985). Los griferidos infracretácicos *Aetostreon couloni* y *Ceratostreon boussingaulti*, de la Formación Rosa Blanca, como indicadores de oscilaciones marinas. *Proyecto cretácico*, 12, 1–14.

Páramo Fonseca, M. E. (2015). Estado actual del conocimiento de los reptiles marinos cretácicos de Colombia. *Reptiles extintos. Volumen en homenaje a Zulma Gasparini*. Publicación electrónica de la Asociación Paleontológica Argentina, 15(1): 40–57.

Pava, A. (1985). Los episodios evaporíticos de la Formación Rosa Blanca. *Proyecto cretácico*, 16, 1–19.

Pulido, O. (1985a). Geología de la plancha 135, San Gil, escala 1:100.000. Ingeominas.

Pulido, O. (1985b). Geología de la plancha 151, Charalá, escala 1:100.000. Ingeominas.

Royero, J. M. y Clavijo, J. (2001). Mapa geológico generalizado, departamento de Santander, escala: 1:300.000. Ingeominas.



Tierra de los Siete Colores, en el municipio de Betulia.

Royero, J. M. y Vargas, R. (1999). Geología del departamento del Santander, escala 1:300.000. Ingeominas.

Velandia, F., Bermúdez, M. A. (2018). The transpressive southern termination of the Bucaramanga fault (Colombia): insights from geological mapping, stress tensors, and fractal analysis. *Journal of Structural Geology*, 115, 190–207.

Velandia, F., García-Delgado, H., Zuluaga, C.A., López, J.A., Bermúdez, M.A., Audemard, F.A. (2020). Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes. *Journal of Structural Geology*, 137, 104087.



Diversidad de formaciones constituyen una verdadera alegoría de la Tierra y su variopinto menú visual.

Paisaje de la serranía de los Yariguies en cercanías del municipio de La Aguada.





Río Suárez en cercanías del municipio de Barbosa.





Paisaje del valle del río Suárez, en cercanías del municipio de Aguada.



## Paisajes geológicos de la cuenca del río Lebrija

---

La cuenca del río Lebrija se inicia en la alta montaña de Santurbán; allí se ubican los nacimientos de las aguas que originan el Río de Oro y el río Suratá. Según los relatos históricos y los comentarios de Agustín Codazzi, el río Lebrija nace a 3050 metros sobre el nivel del mar, en la mesa de Juan Rodríguez. Inicialmente, recibe el nombre de Río de Oro; luego, en su paso por Bucaramanga, se une con el río Suratá, y así constituyen el río Lebrija.

En los siglos XVII y XVIII, y desde la época de la Colonia, los ríos Lebrija y Sogamoso fueron las dos corrientes de agua que permitieron la comunicación entre los pobladores ubicados en la parte alta de la Cordillera Oriental y las comunidades de los alrededores. Posteriormente, al Río de Oro se lo denomina río Botijas, nombre del puerto localizado en su orilla izquierda, y desde donde se podía comenzar la navegación hacia el río Magdalena. Así, tanto este río como el Sogamoso, el segundo en orden de importancia, eran utilizados como vías hacia su encuentro con el río Magdalena. Con el tiempo, las dos cuencas fueron aprovechadas para distintos usos; probablemente, la cuenca del río Botijas (Lebrija) se utilizó especialmente para el transporte de bienes de consumo humano. El camino por tierra, dominado por los arrieros, permitía salir hasta el punto donde los afluentes se tornaban navegables, y, desde allí, por aguas dominadas por los bogas, se agilizaba el proceso de conducción de personas y mercancías, con una velocidad y una capacidad de carga significativas hasta alcanzar el río Magdalena (Bohórquez y Carreño, 2009).

Para tener claridad acerca de ello, empecemos por definir qué es una cuenca hidrográfica. Es un área de territorio drenado por aguas superficiales o subterráneas que vierten en un sistema o red hidrográfica natural, con uno o varios cauces naturales, que pueden desembocar en un río principal. Los límites de la cuenca están determinados por las líneas divisorias de aguas.

Por lo general, la cuenca hidrográfica está conformada por un terreno con relieve de salientes, con lomas, colinas y cerros; depresiones, con valles principales y secundarios; y una red fluvial de caños, arroyos, quebradas y ríos. Las cuencas prestan un apoyo importante para el sostenimiento del hábitat de plantas y animales, y proporcionan agua potable a las personas y a la vida silvestre.

La cuenca del río Lebrija cubre un área de 372.759 hectáreas, que corresponden al 77 % del total de las cuencas bajo la jurisdicción de la Corporación

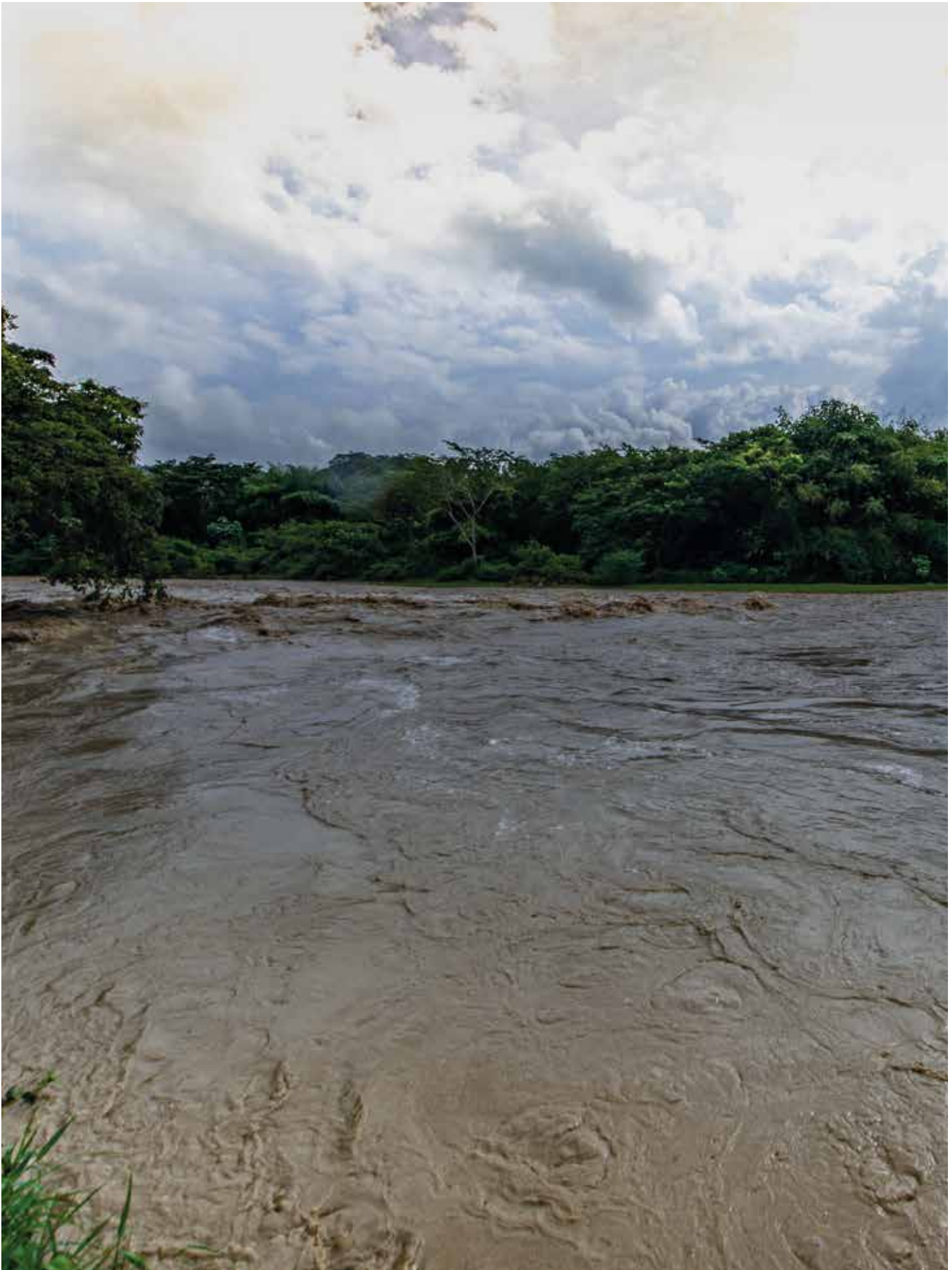
para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). La longitud aproximada del cauce del río es de 228 kilómetros, y tiene una altura media de 1819 metros sobre el nivel del mar. Su cota más alta mide 4000 metros sobre el nivel del mar, y la más baja, 50 metros.

Así mismo, la cuenca del río Lebrija se compone de 8 subcuencas, la de Lebrija Alto, Lebrija Medio, Cáchira Norte, Cáchira Sur, Salamaga, Rionegro, Suratá y Río de Oro. A su vez, las subcuencas se subdividen en veinticinco microcuencas (CDMB, 2014). Las formaciones vegetales se distribuyen en los diferentes ecosistemas reconocidos, avanzando de oriente a occidente: ecosistema páramo, subpáramo, bosque altoandino, bosque andino y de vegetación xerofítica.

En el pasado reciente, la arteria fluvial del río Lebrija funcionó como uno de los principales medios de comunicación y transporte entre



Río Opón en cercanías del municipio de Puerto Parra.



Zona media del río Lebrija en jurisdicción del municipio de Sabana de Torres.





Paisajes de la zona del valle del río Opón en cercanías del municipio de Puerto Parra.

Bucaramanga y la región del Magdalena Medio, así como la línea del ferrocarril que comunicaba a Bucaramanga con los puertos sobre el río Magdalena. Con la crisis del sistema ferroviario colombiano, a finales de la década de los ochenta del siglo pasado, este medio de comunicación desapareció. En la actualidad, la navegación también ha desaparecido, pero sus aguas se encuentran bien aprovechadas para el consumo humano y los desarrollos agrícolas por medio de los distritos de riego. La subcuenca del río Suratá, a través de sus afluentes, el río Tona, río Charta y el río Frío, suministra el agua potable del área metropolitana de Bucaramanga.

Al norte, por el noroccidente de la planicie de Lebrija, la cuenca media se caracteriza por un relieve de riscos y profundos valles; el cauce del

río queda encajonado por las formaciones del relieve y atraviesa rocas sedimentarias, capas subverticales, con inclinación al occidente, hacia la fosa del sinclinal de Nuevo Mundo, que, a su vez, hace parte del flanco oriental del geosinclinal de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. El sinclinal está separado de la parte más profunda de la cuenca por el sistema de falla de La Salina, con orientación norte-sur, que pone en contacto rocas del Cretácico tardío con rocas del Oligoceno-Mioceno del occidente.

En el sector de Vanegas – El Conchal, la agricultura y la ganadería son actividades comunes, mientras que en las llanuras de inundación y de terrazas recientes se desarrollan actividades de minería artesanal de oro. La CDMB ha otorgado al proyecto denominado Rionegro el correspondiente



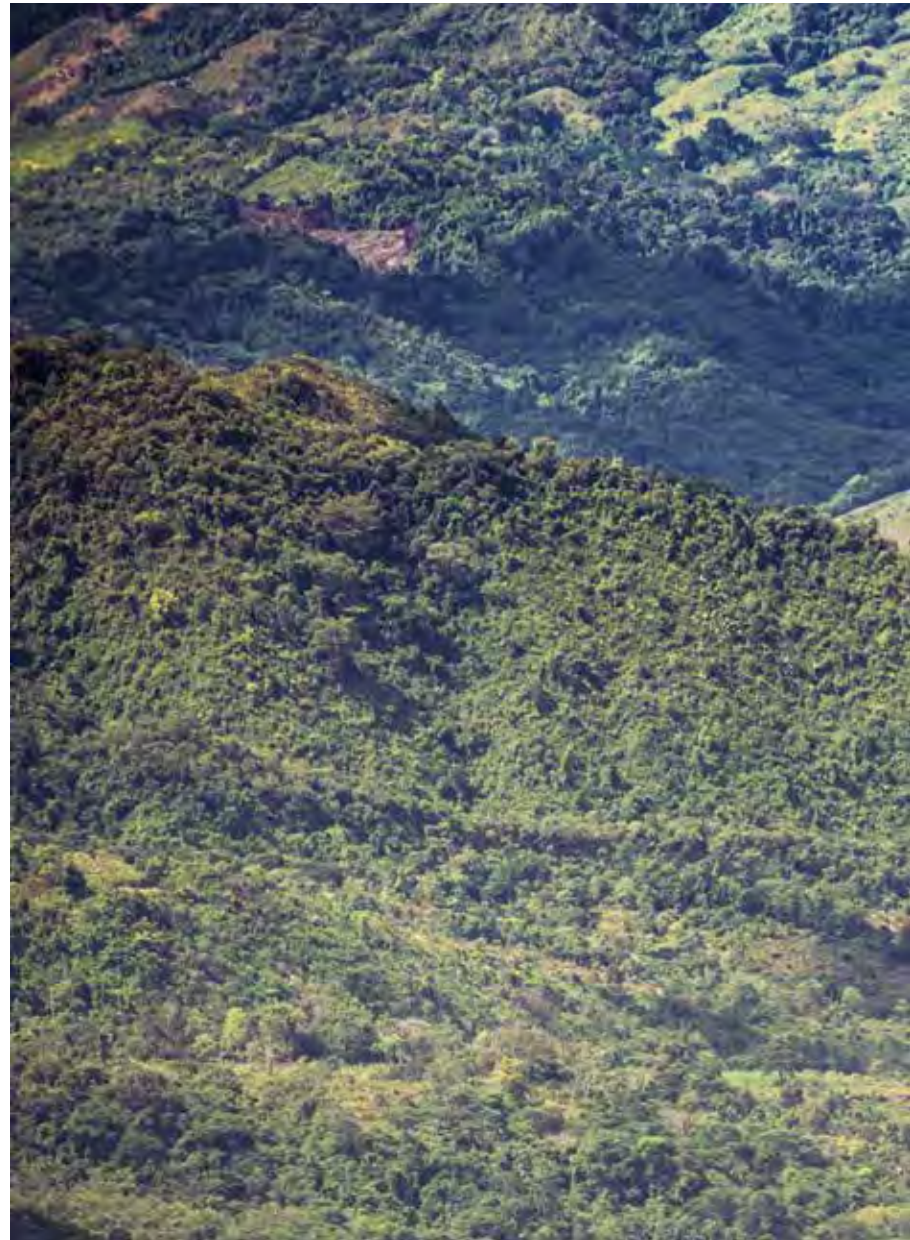
El paisaje transformado a partir del llenado del embalse de Hidrosogamoso, generó un cambio drástico en el entorno. Más de 7 mil hectáreas de espejo de agua, convierten a Topocoro en el embalse más grande del país.

permiso de explotación de oro aluvial mediante paladragas; en las zonas explotadas, la restauración de los terrenos se adelanta utilizando prácticas con buenos resultados.

En cercanías a la ciénaga de Paredes, en las décadas de los ochenta y noventa del siglo pasado, se intervinieron terrenos con depósitos de oro aluvial, situación que causó un gran daño en la zona, debido a la tala indiscriminada de árboles y a la remoción de suelos. En las zonas bajas, se sitúan los distritos de riego de Lebrija y Magará y los extensos cultivos de palma africana. En la región de Sabana de Torres se adelantan actividades agropecuarias, particularmente la ganadería, y en algunos sectores, la extracción de arenas silíceas.

En la cuenca del río Lebrija, el caudal medio multianual se ha calculado en 150,3 metros cúbicos por segundo, y el caudal máximo multianual, en 462,90 metros cúbicos por segundo (Planeación de Santander – UIS, 2011). Cerca de su desembocadura, el cauce del río Lebrija se distribuye en numerosos caños que alimentan varias ciénagas, que finalmente entregan sus aguas al río Magdalena. Allí, el curso del agua se divide en dos grandes brazos que encierran un delta fluvial localizado en su desembocadura. En épocas de invierno esta zona resulta afectada por las inundaciones, pues se trata de un terreno muy plano con una pendiente media de solo 0,20 metros por kilómetro en un trayecto de 56 kilómetros.

La red fluvial de Santander es algo compleja; el 98 % de su área vierte sus aguas al río Magdalena, y el 2 % lo hace en la cuenca del río Arauca. En un trayecto de 263,6 kilómetros, a lo largo del curso del río Magdalena, la red hidrográfica principal de Santander vierte aproximadamente un volumen de agua del 15 % del caudal del río Magdalena. El 45 % de este volumen de agua lo suministra el río Sogamoso, con cerca de 17.035 millones de metros cúbicos



Valle Medio del río Lebrija entre los municipios de Rionegro y Sabana de Torres.

al año; el segundo aporte lo hace el río Carare, con 27 % del caudal; seguido por los ríos Opón y Oponcito, con 15,4 %, y el río Lebrija, con 12,4 %, que equivale a 4739 millones de metros cúbicos al año (Planeación de Santander – UIS, 2011).

La gestión del recurso hídrico le corresponde a la CDMB, jurisdicción que abarca las cuencas hidrográficas de los ríos Lebrija, con 77 % del total de 486.360 hectáreas; Sogamoso, con 15 %; y Chicamocha y Chitagá, cada uno con 4 % (CDMB, 2014).



Conformación del paisaje en el Valle Medio del río Lebrija, caracterizado por ser propenso a grandes periodos de inundación durante la temporada húmeda.

## Referencias bibliográficas

Bohórquez, J. y Carreño, C. (2009). Tiempos y espacios de la circulación: El camino y la ruta en la cuenca del río Sogamoso, una mirada de larga duración. *Historia y sociedad*, (16), 73-93.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CDMB (2014). Plan de Gestión Ambiental Regional. Recuperado de <http://roble.cdm.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=18229>

Secretaría de Planeación de Santander – Universidad Industrial de Santander. (2011). Santander 2030. Síntesis del diagnóstico territorial de Santander. Recuperado de <http://santandercompetitivo.org/media/7504d2bd3b9d8d4e9c3371ab4b8320ddf4f73452.pdf>



Paisaje que conforma el río Carare en el Magdalena Medio santandereano.



## Paisajes geológicos de la provincia del Valle Medio del Magdalena

### Paisajes geológicos del Valle Medio del Magdalena

En el departamento de Santander, el Valle Medio del Río Magdalena está presente en las provincias de Vélez y Yariguíes. Esta región geográfica consiste en una llanura aluvial localizada entre las cordilleras Oriental y Central, y sus límites geográficos coinciden aproximadamente con los límites geológicos que permiten reconocer la cuenca sedimentaria del Valle Medio del Río Magdalena, caracterizado por sus abundantes recursos energéticos de petróleo, gas y carbón.

El Magdalena Medio santandereano cubre un área de 28.300 kilómetros cuadrados; su altitud, a nivel del río, fluctúa entre 150 metros y 50 metros sobre el nivel del mar; y la anchura del valle aluvial del río Magdalena se incrementa hacia el norte.

La cuenca del Valle Medio del Magdalena está limitada al norte por la falla de Bucaramanga, en cercanías a la población de El Banco, y al sur por la falla de Cambao, en inmediaciones de la población de Nariño. El límite oriental está formado por el sistema y la falla del Suárez, mientras que el límite occidental está constituido por la falla de Casabe y por altos estructurales del basamento de rocas ígneas (véase la figura 41).

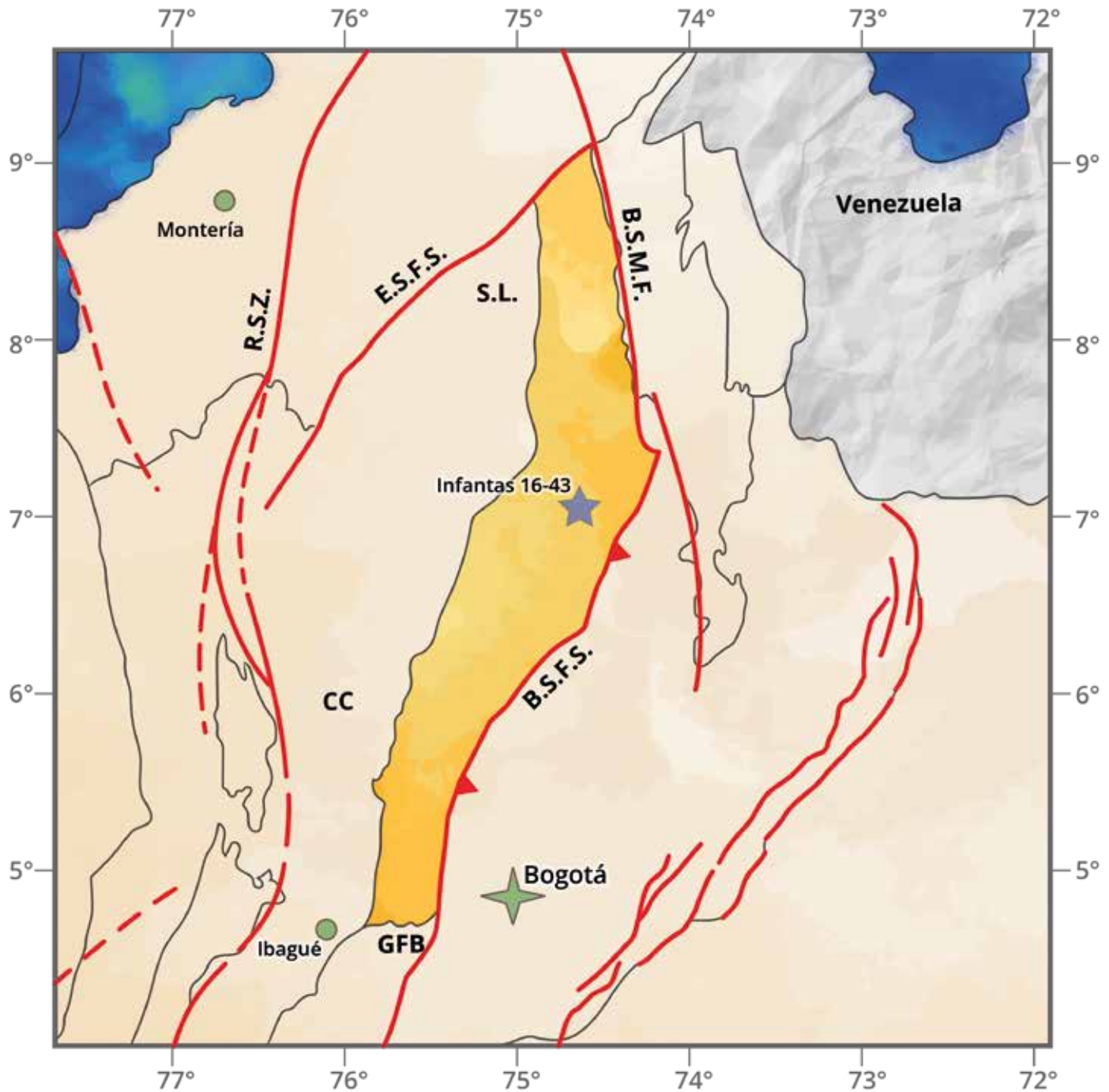


Figura 41. Mapa esquemático del Valle Medio del Magdalena. Modificado de Barrero *et al.* (2007)

La geomorfología del Valle del Magdalena se caracteriza por ser una amplia llanura aluvial formada por la erosión de sedimentos de las cordilleras Oriental y Central y sus depósitos en la cuenca intracordillerana. Las principales geoformas del valle aluvial del Magdalena son el canal principal del río Magdalena y los canales secundarios, que, debido a la alta sedimentación, presentan desplazamientos laterales que ensanchan el cauce. Otras geoformas del valle aluvial son las planicies de inundación, en donde se encuentran numerosas vegas, ciénagas y lagunas. Estas geoformas están en terrenos con alta susceptibilidad de inundación en las épocas lluviosas. Los terrenos más altos están conformados por terrazas aluviales más antiguas.

Los principales afluentes del río Magdalena en la región del Magdalena Medio santandereano son, en orden de sur a norte, los ríos Carare,

Opón, Sogamoso y Lebrija. Estos ríos nacen en la Cordillera Oriental y descienden por cauces de valles angostos y profundos hasta que alcanzan el sistema de fallas de la margen oriental del Magdalena, en donde sus cauces cambian drásticamente al entrar a la llanura aluvial, y forman cauces amplios con meandros, debido a la baja pendiente y a la alta tasa de sedimentación.

En el valle aluvial del Magdalena Medio santandereano hay numerosos cuerpos de agua, como ciénagas y lagunas, que aumentan en abundancia y tamaño hacia el norte. Entre las principales ciénagas y lagunas, en orden de sur a norte, se encuentran las lagunas Palagua, Garrapatas y San Silvestre; y las ciénagas Cachimbero, Opón, La Cira, San Silvestre (en cercanías a la ciudad de Barrancabermeja) y Llanito.



El paso lento del río Magdalena en cercanías de Barrancabermeja.





Paisaje hídrico del río Magdalena en toda su dimensión.





El río Sogamoso en su viaje final en busca del Magdalena. Atrás ha quedado la presa que conforma el gigantesco espejo de agua de Topocoro.

En la región norte del Valle Medio del Magdalena se presenta una gran cantidad de ciénagas asociadas al cauce del río Lebrija, que corre de forma paralela al río Magdalena, y, en medio de sus cauces, se encuentran innumerables ciénagas, entre las que se destacan las de Pato, de Chocó y de los Manatíes (también llamada de Pita), entre otras.

La evolución geológica de este amplio valle se remonta a los comienzos de la era Mesozoica, hace 160 millones de años, cuando se inició la formación de una depresión tectónica en la corteza terrestre, debido a movimientos divergentes o distensivos en el manto superior de la Tierra, que originaron fallas normales. Esta tectónica distensiva se mantuvo por aproximadamente 90 millones de años. A partir

del periodo Paleoceno, la tectónica de la corteza cambia, pasa de distensiva a compresiva, y es así como, durante la era Cenozoica y el tiempo actual, la tectónica del Magdalena ha sido esencialmente compresiva, fenómeno que ha causado la formación de fallas inversas, el levantamiento tectónico y la formación de estructuras plegadas que ocurren en la Cordillera Oriental y en la margen oriental del río. De otra parte, en la margen occidental contra la Cordillera Central no se observan evidencias de tectónica compresiva.

Este valle presenta una secuencia sedimentaria de gran espesor, cuyo depósito ocurrió durante la fase de tectónica extensional entre el Jurásico y el Cretáceo Superior, cuando el hundimiento de la corteza trajo consigo la inundación marina.



Río Carare en cercanías del corregimiento La India del municipio de Landázuri.

Este fenómeno, también conocido como transgresión marina, trajo como resultado el depósito de rocas sedimentarias de composición arcillosa y calcárea, en donde se acumuló y preservó abundante materia orgánica derivada del plancton marino que, posteriormente, dio como resultado la formación de rocas generadoras de hidrocarburos (Mojica, Franco, 1990; García *et al.*, 2009).

En el Valle Medio del Magdalena santandereano y en la Cordillera Oriental, la fase de tectónica compresiva se inició en el Paleoceno, hace 65 millones de años, y continúa en la actualidad. En el Paleoceno medio ocurrió el levantamiento del Macizo rocoso de Santander-Floresta. Durante esta fase de levantamiento, las rocas expuestas fueron erosionadas parcialmente, mientras que la sedimentación prosiguió en las estructuras deprimidas, o cuencas, de forma más o menos continua. Desde el Eoceno hasta el Mioceno se depositaron las formaciones de La Paz, Esmeraldas, Mugrosa y Colorado en ambientes continentales aluviales en el Valle Medio del Magdalena.

Los geólogos han reconocido que la fase principal del levantamiento de la Cordillera Oriental y la configuración actual del Valle Medio del Magdalena ocurrió durante el Mioceno superior, es decir, entre 10 y 5 millones de años atrás. Durante el Mioceno y el Plioceno, el flanco occidental de la cordillera sufrió levantamientos y desplazamientos hacia el occidente. Desde el Mioceno tardío hasta el Plioceno-Pleistoceno se depositó la última secuencia sedimentaria de este valle, representada por formaciones geológicas conocidas como el grupo Real, el grupo Mesa y depósitos recientes.

La presencia de resumideros o manaderos de petróleo es una característica de este valle, lo que indica la existencia de yacimientos de petróleo en el subsuelo. La ocurrencia de estos manaderos fue reportada desde tiempos de la Colonia en las crónicas de Fernández de Oviedo, quien en 1541 mencionó la ocurrencia de manaderos en La Tora, una localidad cercana a Barrancabermeja. En 1905, el comerciante José Joaquín Bohórquez encontró manaderos de petróleo en el caño San Antonio, y se asoció con Roberto de Mares para formar una compañía de explotación de petróleo; con ello en mente, solicitaron la concesión de Mares para explotación de petróleo, otorgada por el Gobierno central de Bogotá.

En 1915, los geólogos y los ingenieros de la compañía Troco iniciaron los trabajos de exploración de la zona. Entre 1916 y 1917 inició la perforación de dos pozos en la localidad de Infantas, cerca de un manadero; y en 1918 se inició la producción de petróleo del campo Infantas (Morales, 1958; Vásquez, 2012). En 1919, la compañía Troco fue adquirida por

la multinacional Standard Oil N. J. En la actualidad, esta compañía está en manos de la nación, por medio de Ecopetrol. La explotación petrolera ha continuado en el Valle Medio del Magdalena. Hoy en día, esta cuenca contiene grandes reservas de petróleo y de gas en diferentes tipos de yacimientos.

El paisaje del Magdalena Medio santandereano está hoy gravemente afectado por la explotación petrolera, así como también por la ganadería extensiva y los cultivos de palma africana, actividades que han propiciado una extensiva y destructiva deforestación de la cuenca media del Magdalena. No obstante, esta región presenta un paisaje geológico de inmensa belleza y significado para los habitantes de la región.

En algunas veredas cercanas al municipio de Sabana de Torres, se localizan afloramientos naturales de crudo.

## Referencias bibliográficas

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C. Y Martínez, J., 2007. Colombian sedimentary basins: Nomenclature, boundaries and petroleum geology, a new proposal. ANH, Bogotá.

Vásquez, H. (2012). La historia del petróleo en Colombia. *Revista Universidad Eafit*, 30(93), 99-107.

Mojica, J. y Franco, R. (1990). Estructura y evolución tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. *Geología Colombiana*, (17), 41-64.

Morales, L. G. *et al.* (1958). General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia. American Association of Petroleum Geologists (AAPG). Recuperado de <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/1490/chapter/107178586/General-Geology-and-Oil-Occurrences-of-Middle>

García, M.; Mier, R.; Cruz, L. E. y Vásquez, M. (2009). Evaluación del potencial hidrocarbúrico de las cuencas colombianas. Informe Interno Contrato 2081941 Fonade-UIS-ANH.





Represa de Topocoro.



## Paisajes geológicos del valle del río Sogamoso

---

El cauce del río Sogamoso en Santander presenta variados e interesantes paisajes geológicos. En la confluencia de los ríos Chicamocha y Suárez, conocida como las Juntas, o también Raspaculos, en alusión a la profundidad del cañón, se observa un paisaje geológico muy similar al del Gran Cañón del Colorado en Estados Unidos, puesto que posee una espectacular secuencia de seis formaciones geológicas en posición subhorizontal. Hacia la base de esta secuencia se encuentran las formaciones Girón y Jordán, caracterizadas por los colores rojizos y violáceos, que originan escarpes inclinados desde el nivel del cauce del río Sogamoso.

Ascendiendo por esta secuencia se encuentra el primer escarpe vertical formado por rocas de arenisca duras que dan origen a la Formación Los Santos. Encima de esta formación se encuentra un grueso nivel de rocas calizas con importantes contenidos de yeso. Estas calizas forman escarpes verticales de coloraciones grises, denominadas por los geólogos Formación Rosa Blanca. Por encima de esta unidad se encuentra una secuencia de capas de rocas arcillosas negra con abundantes concreciones subredondeadas que forman una topografía de baja pendiente, conocida como Formación Paja.





Uno de los ríos que alimenta el embalse de Topocoro.

Por último, en la parte superior de Cañón del Chicamocha, entre Barichara y Villa Nueva, se observa un escarpe vertical formado por la alternancia de capas de calizas grises y arcillolitas negras, conocida por los geólogos como la Formación Tablazo. La diferencia de altura entre el fondo del cauce del río y el escarpe superior varía entre 1000 y 1500 metros, y el espesor de la secuencia estratigráfica antes descrita supera los 5.000 metros, en donde se exhiben rocas sedimentarias con edades que datan del periodo entre el Jurásico y el Cretáceo inferior correspondiente, es decir, de 165 a 95 millones de años atrás.

La presa La Tora, cimentada sobre las areniscas de la Formación La Paz, modificó sensiblemente el paisaje geológico del cauce del río Sogamoso. Esta presa de 190 metros de altura forma el embalse de Hidrosogamoso con una extensión de 7000 hectáreas.





Conformación de la represa de Topocoro, a partir del surtido hídrico del río Sogamoso.



Presas sobre el río Sogamoso, que conforma la hidroeléctrica de Topocoro.



Rezumadero de petróleo en cercanías del municipio de Sabana de Torres.



## Paisajes geológicos relacionados con rezumaderos de petróleo

---

Los rezumaderos de petróleo en el Valle Medio del Magdalena son un fenómeno común y de gran impacto económico, debido a que a partir de ellos se desarrolló la explotación petrolera en esa zona, como también ha sucedido en muchas provincias petroleras del mundo. Estos rezumaderos se originan a profundidades superiores a dos kilómetros, donde la temperatura cercana a los 100 °C y la alta presión actúan sobre la materia orgánica preservada en rocas sedimentarias transformándola parcialmente en petróleo. Este, una vez formado, comienza a migrar a través de un entramado de microfracturas en las rocas hasta conectarse con macrofracturas asociadas a fallas geológicas, a lo largo de las cuales el petróleo continúa su migración lentamente hacia la superficie, donde se manifiesta como rezumaderos de petróleo y gas. Este es el caso de los rezumaderos de la región de Provincia, La Tigra y La Esperanza, en donde es común observar la presencia de asfalto sólido en zonas de falla y rezumaderos de petróleo.

## Santander: Tierra de temblores

La formación del geólogo pasa por varios estadios académicos y prácticos, que constituyen las experiencias iniciáticas que más emocionan y motivan a estudiantes y docentes.

Durante veinte días, equipados de brújula, martillo, lupa y mapa topográfico, los integrantes del grupo de exploración recorren distintos espacios; toman múltiples datos; hacen descripciones de las rocas encontradas; miden capas, estructuras, como pliegues y planos de falla; para, posteriormente, traducir esta información y representarla en mapas geológicos de altísimo detalle.

Durante el desarrollo de una de estas prácticas de exploración con los estudiantes de la asignatura de Campo I, ocurrió que cierto día, mientras estábamos reunidos en el parque principal de Zapatoca, discutiendo sobre los acontecimientos de la práctica diaria, un hombre se acercó para ofrecernos libros usados que llevaba en un pequeño carrito. Así que tomé uno de los libros y me lo enseñó; se trataba de *Crónicas de Bucaramanga*, obra escrita por el ilustre profesor José Joaquín García a finales del siglo XIX, donde se describen breves narraciones sobre acontecimientos cotidianos sucedidos en la entonces pequeña villa de Bucaramanga, desde su fundación hasta el año 1895.

Al intentar hilvanar las ideas de estos párrafos, recordé que hacía tiempo lo había leído, y que en él había hallado narraciones sobre hechos relacionados con temblores que habían quedado registrados en la memoria de los habitantes de la ciudad. Una de esas citas incluidas en las crónicas es la siguiente: «Varios temblores de tierra que, con cortos intervalos, sintieron los habitantes





Vista panorámica de Bucaramanga, asentada sobre la gran meseta de Los Búcaros.



Constantes movimientos sísmicos en la zona de Betulia al paso del río Sogamoso.

de la aldea, sin que produjeran daño en las habitaciones y que calculase [que] tuvieron lugar en octubre de 1743».

Y es que en esa Bucaramanga solariega y silente, donde todos los vecinos se conocían, los acontecimientos sucedidos adquirirían una dimensión tan especial que se convertían en material de crónicas de hechos y sucesos. Veamos cómo en el mismo libro del profesor García se narraban hechos con referencia a los temblores: «... Corría el año [...]1877, cerca de las 8 de la mañana, se hizo sentir un fuerte movimiento de tierra, que habría de repetirse unas horas después, causando daños en dos casas, pero, sobre todo, llenando de pánico a todas las gentes del poblado y sus alrededores [sic]».

La fidelidad narrativa del cronista de la Bucaramanga de aquellos tiempos nos permite tener referencia de la actividad de la tierra en esta ciudad. Esos temblores solían generar más angustia que daños materiales que pudieran determinar una situación de real preocupación,

a diferencia de lo que sí sucedió en otras poblaciones cercanas, como en 1869 en San José de La Robada. En ese año un fuerte sismo acabó prácticamente con el pueblo, a tal punto que se hizo necesaria su reubicación en el pleno corazón de la Provincia Comunera, donde se lo encuentra actualmente con el nombre de Galán.

Uno de los temblores que no solo propició todas las escenas de pánico posible, sino que, en efecto, dejó una estela de destrucción y casi arrasó con las ciudades vecinas de Cúcuta y Pamplona, se dio el 18 de mayo de 1875. Así lo narra el profesor García en una de sus crónicas:

El 18 de mayo de 1875 a las once del día, se sintió un fuerte temblor de tierra que duró bastantes segundos; y el mismo día, por la noche, se repitió el temblor, y los concurrentes se precipitaron a salir, atropellándose todos en la puerta y causando la muerte de una mujer del pueblo, ya anciana, que dio en tierra al salir y por sobre la cual pasaron los demás en medio de la confusión. Los movimientos siguieron sucediéndose a cortos

intervalos, y el estado de alarma y de terror se hizo cada vez más sensible con motivo de las lamentables noticias que transmitió el telégrafo, referentes a la destrucción completa de Cúcuta y sus alrededores, por causa del terremoto.

En otras citas y reportes se mencionan al menos siete sismos en Bucaramanga, ocurridos entre los años 1550 y 1949, mientras que en reportes más actuales se indica que entre los años 2000 y 2010, en el entorno de la meseta de Bucaramanga, se contabilizaron 151 sismos con magnitudes superiores a 4 grados en la escala de Richter.

Con base en esta cronología de eventos sísmicos registrados, cabe preguntarse por qué ocurren los sismos en Santander. La respuesta solo la podemos dar si abordamos las características de la dinámica del planeta.

Tres son las fuentes que nos permiten aproximarnos a la respuesta de este interrogante. La primera consiste en las observaciones y las mediciones de la sismicidad global y

su integración con mapas topográficos y magnéticos del fondo marino; la segunda es la tabla del tiempo geológico, y la última es la medición directa a través de unidades de GPS (*global positioning system*).

El planeta es una estructura dinámica con un radio de 6370 kilómetros, cuyo fondo oceánico tiende a ser uniforme, pues se mueve constantemente y no genera una deformación intensa. Por el contrario, la masa continental está conformada por la corteza, los mantos inferior y superior y el núcleo externo e interno.

La corteza y el manto superior (su parte más superficial) conforman la litósfera (*líthos*, ‘roca’). Esta capa terrestre mantiene una estructura rígida, a la manera de un rompecabezas de placas con diferentes tamaños y de naturaleza oceánica o continental, que “flotan” sobre la astenósfera (*astenia*, ‘suave’), localizada entre el límite del manto inferior y el manto superior, aproximadamente a 660 kilómetros de profundidad.

El último de los grandes acontecimientos telúricos de la región fue el llamado “terremoto de Cúcuta”, en 1875, que destruyó varias poblaciones, como Pamplona.





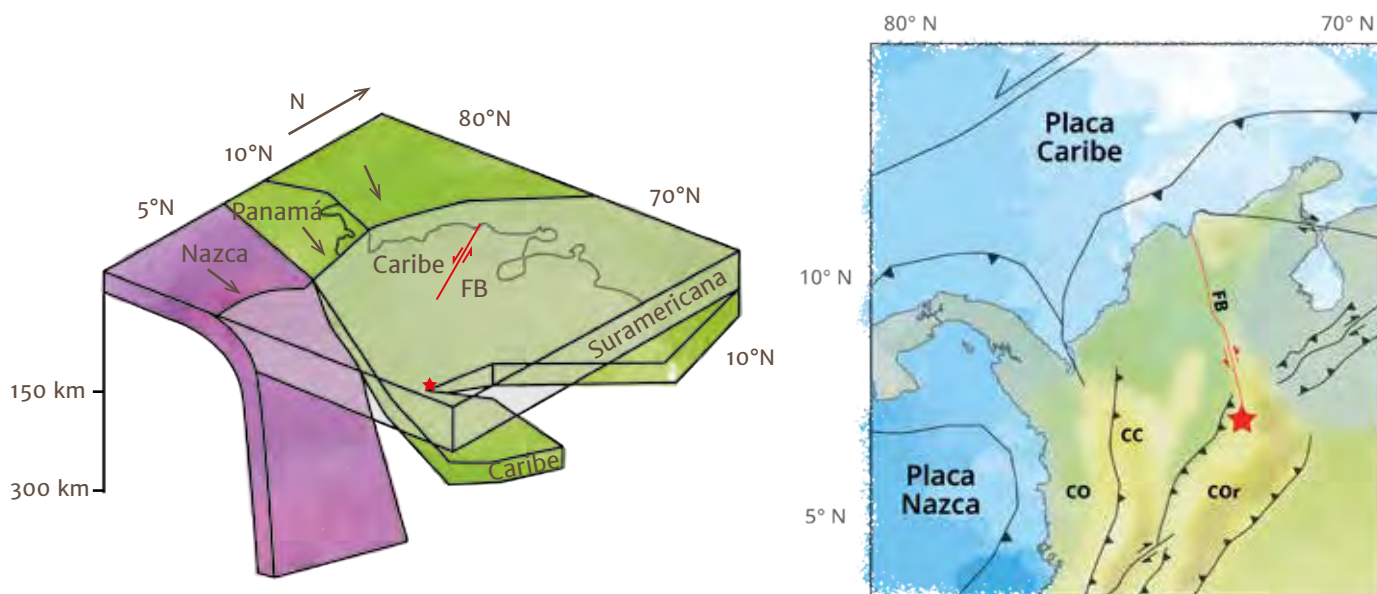
En los bordes de Placa ocurren la mayoría de las inestabilidades y los procesos geológicos, como volcanes o terremotos, producto de una serie de sucesos que suman para propiciarlos. Uno de estos factores es el de los cambios que sufren las placas tectónicas. A través del tiempo geológico, las placas crecen a medida que se separan (márgenes divergentes); mientras que, en los márgenes donde las placas se acercan (márgenes convergentes), las placas oceánicas se destruyen, en un proceso llamado subducción, donde la placa más densa se desliza bajo la placa continental. En Colombia, por ejemplo, interactúan tres placas, dos de ellas oceánicas, la de Nazca y la del Caribe, que se desplazan bajo la placa suramericana a velocidades de hasta 6 centímetros por año. Este desplazamiento condiciona los procesos geológicos de la superficie, como la formación de cordilleras, fallas geológicas, volcanes y cuencas, entre otros.

Aún no hay consenso sobre la configuración de la interacción entre las placas de Nazca, Caribe y Suramericana; sin embargo, se puede decir que el

proceso de subducción ha sido el responsable del crecimiento de la Cordillera Central, la Cordillera Occidental y, la más joven, la Cordillera Oriental, así como de la notable particularidad del llamado nido sísmico de Bucaramanga.

Un nido sísmico es un conjunto de sismos con epicentros concentrados en un área relativamente reducida, y esos sismos tienden a tener una magnitud constante. Los tres nidos sísmicos más conocidos y más estudiados en el mundo son los nidos de Vrancea (Rumania), Hindú Kush (Afganistán) y Bucaramanga (Colombia).

Con una sismicidad que ocurre aproximadamente a 150 kilómetros de profundidad, y unas magnitudes alrededor de los 5<sup>o</sup>, el nido sísmico de Bucaramanga registra una densidad superior a los 2000 sismos. Sobre su presencia hay dos hipótesis: La primera considera que este nido sísmico se originó como resultado de un cambio en la fase mineral por deshidratación de minerales de la placa oceánica que subduce o que se desliza bajo



**Figura 42.** Esquema ilustrativo de la interacción entre las placas tectónicas de Suramérica, Nazca, Caribe, y su relación con el nido sísmico de Bucaramanga (ver estrella). Modificado de Bissig *et al.* (2014)



Fenómenos de movimientos en masa, popularmente denominados “volcanes”, son una constante en diferentes puntos del territorio santandereano.

la placa suramericana. La segunda señala que esta placa oceánica se está desgarrando o rompiendo exactamente en la zona donde se localiza nuestro departamento (véase la figura 4.2).

En Santander existen igualmente otras fuentes sísmicas asociadas a las fallas geológicas, las cuales son fracturas con desplazamientos que pueden variar con el tiempo entre centímetros y kilómetros. En sismos muy grandes, los desplazamientos típicos de las fallas pueden llegar a los dos metros. Entre las fallas más notorias para la región santandereana, están las de Bucaramanga, Suárez, La Salina y otras fallas menores, que condicionan el paisaje y la exposición de las rocas que hoy tenemos.

Así, podemos concluir que la sismicidad en Santander obedece a la dinámica del planeta Tierra y a sus procesos geológicos. Existen al menos dos fuentes sísmicas en Santander: una superficial, caracterizada por sismos a profundidades inferiores a 60 kilómetros, y otra profunda, con sismos que ocurren a 145-

165 kilómetros de profundidad. Los sismos más superficiales están relacionados con los desplazamientos de fallas geológicas. La sismicidad profunda constante se debe al nido sísmico de Bucaramanga, un fenómeno ligado a la subducción de la placa de Nazca y su interacción con el manto superior. Las fallas geológicas y el nido sísmico de Bucaramanga son dos fenómenos geológicos que han estado presentes y que se han desarrollado durante millones de años.

Por último, valga señalar que los sismos no son predecibles, y que sus efectos destructivos están relacionados con el escaso conocimiento del fenómeno de la sismicidad, de sus fuentes específicas, así como con la falta de preparación de la sociedad. Por tanto, es necesario mejorar el detalle de los mapas geológicos y las redes de monitoreo, y establecer la condición de obligatoriedad del cumplimiento de las normas para construcciones sismorresistentes, así como del hábito de preparación ante estos eventos.



El trabajo exploratorio del geólogo, estudiando la historia escrita en cada roca.

## La geología al servicio de la sociedad

Con seguridad, cualquier persona que oiga o lea la palabra ‘geología’ evocará alguna imagen o recuerdo relacionado, entre muchos otros, con rocas, minerales, fósiles, sismos, volcanes, deslizamientos de tierra, y posiblemente también la relacionará con imágenes de minas subterráneas o a cielo abierto. Son tan variadas las imágenes que evoca el concepto ‘geología’, que perfectamente podemos señalar que esta ciencia está presente prácticamente en todas las esferas de la actividad humana. La razón de su presencia en diversos ámbitos se debe a que la geología no solo estudia los materiales rocosos, sino que estudia los procesos internos y externos que mantienen a nuestro “planeta vivo”.

Gracias a la geología, hemos podido conocer el origen de la Tierra y su evolución, que comprende sus cambios climáticos, biológicos, continentales. Esa ingente información sobre el pasado de nuestro planeta, registrada en las rocas, es la base para construir nuestro presente y proyectar nuestro futuro.

Los geólogos nos encargamos de explorar y encontrar aquellos recursos del subsuelo que la humanidad necesita para su supervivencia, para elaborar las actuales tecnologías que la sociedad demanda, y, en general, para sostener el actual modo de vida del ser humano.

La geología provee esos materiales que la sociedad requiere para garantizar la existencia y el desarrollo de los medios que utiliza. En el ámbito de la comunicación, se utilizan materiales geológicos para la fabricación de celulares, tabletas, computadores, televisores, satélites, etcétera. En el sector del transporte, para la fabricación de aviones, cohetes, buses, carros, bicicletas, motos... Lo mismo sucede con el sistema de salud, en que se requieren determinados materiales para la fabricación de equipos médicos.

Entre muchos otros campos que se favorecen con los aportes de la geología se encuentran la construcción, la agroindustria y la energía. El primero necesita materiales para levantar puentes, tender carreteras y erigir edificios y casas; la segunda, para la producción de insumos y nutrientes para cultivos; y, la tercera, para la fabricación de cables conductores de energía eléctrica, el combustible para el transporte terrestre, aéreo, marino e, incluso, se necesitan determinados conocimientos geológicos para la explotación del gas natural de uso doméstico.

Además, desde la geología es posible hacer aportes al campo de la minería y los hidrocarburos, y se generan conocimientos fundamentales para la búsqueda y la gestión del agua, la construcción de la infraestructura, la solución de problemas de criminalística (geología forense), la remediación de suelos, la educación y el desarrollo de las ciencias del espacio, entre otros.

De la misma forma en que el campesino siembra y cosecha los alimentos, los procesos geológicos han sembrado en nuestro planeta los recursos que nuestra sociedad requiere; y así como el campesino ama y cuida su campo, el geólogo y los geocientíficos amamos el planeta y cuidamos su salud.

Los saberes de la geología han sido utilizados generalmente para favorecer el bienestar del ser humano y de la sociedad, y las acciones de la comunidad geocientífica se han traducido en una mejor calidad de vida para las personas y el cuidado de nuestro entorno. Por ello, se hace necesario reconocer la importancia de esta ciencia por sus contribuciones para garantizar la

supervivencia de las diferentes formas de vida de nuestro planeta, que desafortunadamente ha sido víctima de los desastrosos de la humanidad en las últimas décadas.

Tras la observación de los procesos cíclicos actuales, con una dinámica similar a la de las mareas con sus movimientos constantes, o la de los ríos que cada año desbordan sus cauces inundando a su paso los terrenos circundantes, el geólogo es quien encuentra los patrones de esa dinámica para predecir futuros comportamientos de las mareas o los aumentos extraordinarios del caudal de un río. De ahí que para el geólogo sea tan importante estudiar el pasado, porque en el pasado encuentra esas claves que le permiten formular las teorías de posibles hechos futuros.

El estudio de los últimos 200 millones de años, mediante las evidencias presentes en los registros de sedimentos que hoy hacen parte de las rocas, en los fósiles preservados y

en el hielo de los cascos polares, ha develado que en épocas remotas nuestro planeta ha pasado tanto por ciclos cálidos como por ciclos considerablemente fríos. Toda la evidencia apunta a que la presencia de dióxido de carbono en la atmósfera es el principal agente de los cambios climáticos. De hecho, las grandes cantidades de este compuesto en la atmósfera están asociadas al ciclo más cálido que ha vivido la Tierra en los últimos 55 millones de años (Paleoceno-Eoceno). Durante este periodo, las causas del aumento de CO<sub>2</sub> están relacionadas con periodos de eventos volcánicos, en extremo activos y con extensión global; no obstante, el incremento de este gas en la actualidad tiene su causa principal en las actividades que realiza el hombre sobre el medioambiente.

Se estima que, desde 1750, más de 1850 billones de toneladas de este gas han sido liberadas en la atmósfera, y casi la mitad de este valor es producto de la quema de combustibles fósiles.







El estudio de las rocas por parte de los geólogos está íntimamente relacionado con los conceptos de modernidad y transformación tecnológica de la sociedad.

Tantos años de desarrollo industrial y de evolución de las ciudades no solamente cargaron la atmósfera con gases de efecto invernadero, sino que también han dejado su marca en la calidad de las aguas y los suelos, que hoy reclaman nuestra inmediata atención.

Conocer el pasado nos permite comprender y entender el presente, y estos conocimientos deben servirnos para tomar las medidas necesarias para ajustar los ciclos naturales que hemos alterado, a fin de devolverle la salud al planeta, que empieza y termina en la salud del medioambiente. En este sentido, resulta fundamental conocer las capacidades del medio para proveer los servicios geosistémicos esenciales, como la energía, el agua, los recursos minerales; o regulatorios, como su capacidad de recuperar el equilibrio después de estar sometido a un agente extraño; e, incluso, los servicios culturales, como el disfrute de un paisaje.

Probablemente, la acción de la geología en beneficio de la sociedad es más evidente con la intervención de las ciencias aplicadas o las ingenierías, cuyos profesionales, como los geotecnistas, los ingenieros geológicos, los hidrogeólogos, los geólogos de desarrollo y los geólogos ambientales, entre otros, ayudan a moldear los espacios rurales y urbanos, para que sean más seguros, funcionales y sostenibles en el futuro. La valoración de los riesgos geológicos asociados a sismos, deslizamientos, volcanes, tsunamis y otros riesgos contribuye al bienestar de nuestra sociedad. La exploración y la explotación de aguas subterráneas aseguran la supervivencia de las comunidades, y su uso en las diferentes áreas de la industria (energía y recursos minerales) asegura el crecimiento económico en beneficio de la sociedad.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que la energía y los minerales no solo son el área usualmente más conocida de la geología, sino

que también es la más polémica. Al respecto, cabe señalar que actualmente es prioritario hacer un tránsito rápido hacia un modelo de economía que reduzca el uso de combustibles fósiles, a fin de asegurar la conservación del planeta y la supervivencia de sus habitantes. No obstante, hasta el momento no se ha hecho evidente un sistema que pueda reemplazar estas fuentes de energía y que sea competitivo en términos de costos y de contaminación asociada.

No hay que perder de vista que los materiales en los que se basa la fabricación de los productos tecnológicos que están liderando en todos los ámbitos públicos y privados provienen de minerales exóticos y escasos. De hecho, el descubrimiento, la extracción y la comercialización de estos minerales es posible gracias a las ciencias de la tierra que, a partir de la exploración, descubren e identifican los materiales que posteriormente serán la materia prima para la fabricación de diversos productos. Usualmente, en la cotidianidad se pasa por alto la inclusión de estos recursos en nuestras rutinas, como el hecho de que la cabeza de un fósforo contiene ese elemento químico homónimo que tiene su origen en las minas.

A manera de conclusión, es posible subrayar que la geología está presente por doquier. Esta ciencia ha estado íntimamente ligada al desarrollo de la sociedad moderna, y tiene, en buena parte, la responsabilidad de hacer posible la existencia de las sociedades futuras. De ahí también la enorme importancia de que haya una transformación cultural en nuestra sociedad. Si proveemos a las actuales generaciones de una buena educación en ciencias de la tierra, que les permita tomar conciencia de la estrecha relación entre el hombre y el medioambiente, entonces existe la esperanza de efectuar un cambio cultural que nos permita actuar en coherencia con la responsabilidad de mantener el buen estado de salud de nuestro hogar planetario.





Vista lateral del edificio Jorge Bautista Vesga, sede de la facultad de Ingenierías Físicoquímicas de la UIS.





Carrera 27 calle 9, ciudad universitaria  
Teléfono: (57) 7 634 40 00  
Bucaramanga, Colombia

Universidad  
Industrial de  
Santander

