

# Discriminación de la relación clima, relieve y tectónica en un sector de la cuenca Oriental, Cordillera Oriental de Colombia, mediante geomorfología y termocronología cuantitativa

Lady Alejandra Barrera-Chaparro<sup>1,2\*</sup>; Mauricio Alberto Bermúdez-Cella<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela de Ingeniería Geológica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Colombia. (\*) lady.barrera01@uptc.edu.co; mauricio.bermudez@uptc.edu.co

<sup>2</sup>Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil.

## Resumen

Dentro de la Cordillera Oriental de Colombia nos enfocamos en el Anticlinal de Arcabuco, el cual es un pliegue asimétrico cuyo núcleo está constituido por rocas sedimentarias del Jurásico. La región considerada incluye las fallas activas inversas de Soapaga y Boyacá; la actividad de estas fallas, la evolución geomorfológica y su relación con la erosión actual de esta zona ha sido poco estudiada. Mediante la aplicación de geomorfología cuantitativa se discriminó la relación entre clima, relieve y tectónica o el posible acoplamiento de estos procesos. Con este propósito se incorporaron en el estudio datos de precipitación, relieve, integral hipsométrica (IH), índice de empinamiento, sismicidad y datos termocronológicos. Utilizando la comparación estadística de las diferentes variables calculadas se concluye que la actividad tectónica producto de la interacción principalmente de las fallas de Boyacá y Soapaga está determinando el modelamiento del relieve actual. Adicionalmente, el análisis geomorfométrico permitió discriminar cuencas en diferentes estados evolutivos. La cuenca Chicamocha en estado senil (IH=0,27) y las cuencas Huertas, Pómeca y Tolotá en una etapa de madurez (IH=0,34, IH=0,44, IH=0,31, respectivamente).

**Palabras clave:** Precipitación; Falla de Boyacá; Falla de Soapaga; Sismicidad; Erosión a largo plazo.

## Discrimination of the climate, relief, and tectonic relationship in a sector of the Eastern Basin, Eastern Cordillera of Colombia through geomorphology and quantitative thermochronology

## Abstract

At the Colombian Eastern Cordillera, we focused on the Arcabuco Anticline, which is an asymmetric fold with a core of Jurassic sedimentary rocks. The region considered includes the active reverse faults of Soapaga and Boyacá, the activity of these faults, the geomorphological evolution and its relationship with the current erosion of this area have been little studied. By applying quantitative geomorphology, the relationship between climate, relief, and tectonics, as well as the possible coupling of these processes, was distinguished. For this purpose, the study incorporated data on precipitation, relief, hypsometric integral (HI), steepness index, seismicity, and thermochronological. Using statistical comparison of the different calculated variables, it is concluded that tectonic activity,

---

Forma de citar: Barrera-Chaparro, L.A.; Bermúdez-Cella, M.A. (2024). Discriminación de la relación clima, relieve y tectónica en un sector de la cuenca Oriental, Cordillera Oriental de Colombia mediante geomorfología y termocronología cuantitativa. *Boletín de Geología*, 46(3), 127-146. <https://doi.org/10.18273/revbol.v46n3-2024005>

primarily resulting from the interaction of the Boyacá and Soapaga faults, is determining the shaping of the current relief. Additionally, the geomorphometric analysis allowed for the discrimination of basins at different evolutionary stages. The Chicamocha Basin is in a senile stage (HI=0.27), while the Huertas, Pómeca, and Tolotá Basins are in mature stages (HI=0.34, HI=0.44, HI=0.31, respectively).

**Keywords:** Precipitation; Boyacá Fault; Soapaga Fault; Seismicity; Long-term erosion.

## Introducción

La interacción de los agentes modeladores como el clima, relieve y tectónica puede explicar el comportamiento del paisaje (García-Delgado *et al.*, 2021). Los orógenos activos pueden proporcionar una retroalimentación dinámica entre el clima y la tectónica mediante la erosión y el levantamiento de rocas (Reiners y Brandon, 2006). Una región clave de la interacción entre procesos tectónicos y erosivos corresponde a los Andes, un cinturón montañoso tectónicamente activo, cuyo estudio de la interacción entre las variables mencionadas permite comprender su evolución topográfica (Bookhagen y Strecker, 2008).

En la Cordillera Oriental de Colombia estudios recientes como Hernández-Chaparro *et al.* (2021) y Meléndez-Granados *et al.* (2021) buscan discriminar la interacción entre los agentes controladores del relieve actual a corto y largo plazo. Un sector poco analizado es el Anticlinal de Arcabuco (Figura 1), conformado principalmente por formaciones sedimentarias de edad jurásica entre las cuales destacan: Palermo, Montebel y Rusia (Kammer y Sánchez, 2006). Esta estructura presenta mayor amplitud hacia el norte y en el sur se hace más estrecha; el flanco occidental tiene inclinaciones desde 22 hasta 45°NW, mientras que el oriental posee inclinación de hasta 52°SE (Patarroyo y Moreno-Murillo, 1997). Mediciones en la terminación periclinal del Anticlinal de Arcabuco atestiguan una deformación compresiva moderada, pero bastante homogénea, que afecta el basamento (Kammer, 1997).

Este pliegue se encuentra en el bloque yacente de la falla de Boyacá (Kammer y Sánchez, 2006) y próximo a la falla de Soapaga (Figura 1). Estos lineamientos hacen parte de la terminación sur de la falla de Bucaramanga (Velandia y Bermúdez, 2018). Adicionalmente, estas fallas experimentaron inversión tectónica durante el inicio de la orogenia andina (Tesón *et al.*, 2013). La falla de Boyacá exhibe actividad tectónica significativa desde el Cretácico superior hasta el Mioceno medio (Meléndez-Granados *et al.*, 2021).

La actividad reciente de fallas y el acoplamiento con procesos superficiales favorecen la transformación del relieve actual. Por esta razón, el objetivo es estimar parámetros a corto y largo plazo para las cuencas hidrográficas (Figura 1A) que permitan dilucidar las posibles relaciones entre los posibles agentes controladores del paisaje, como podrían ser el clima, el relieve y la tectónica.

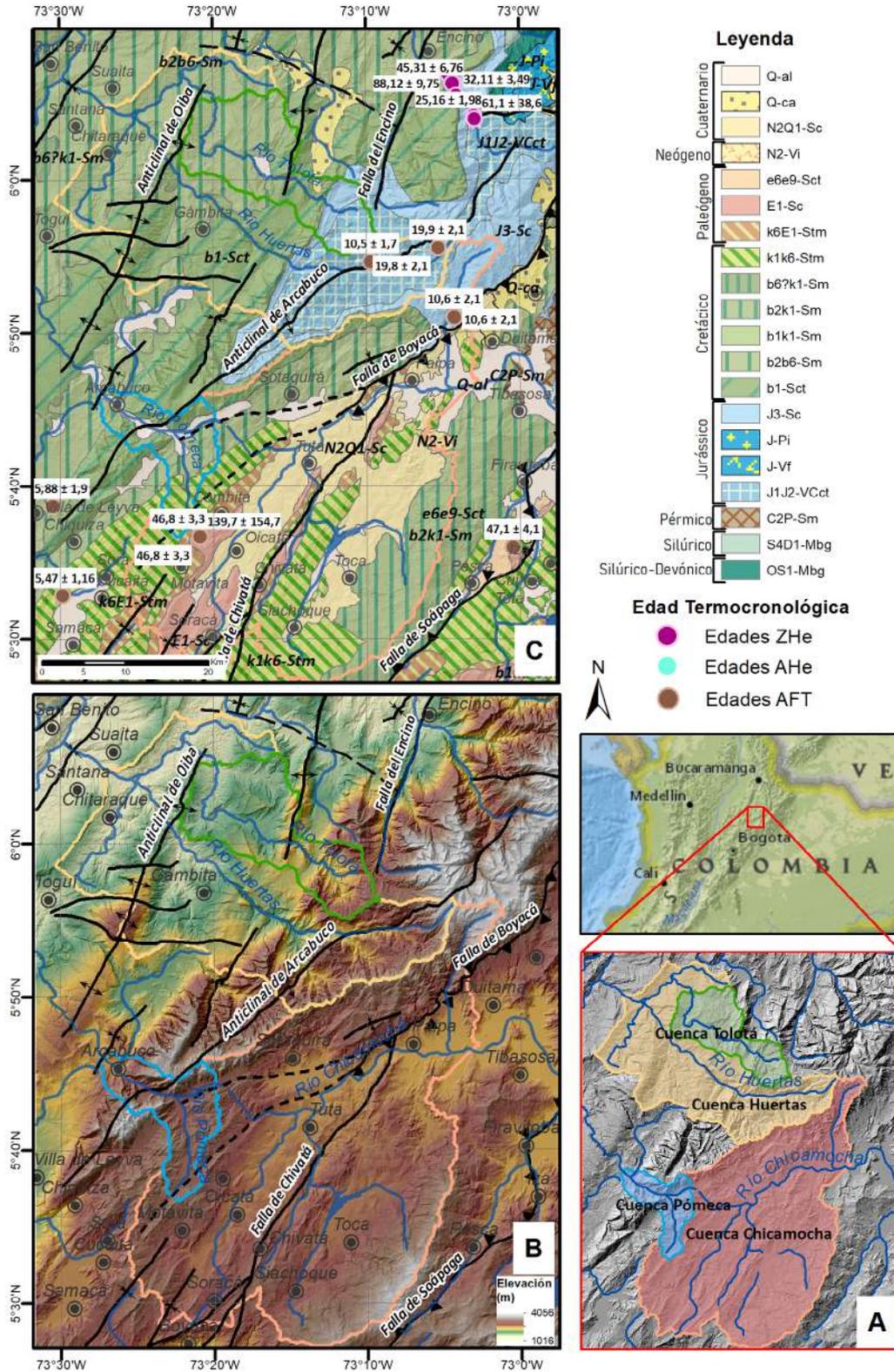
## Descripción de área de estudio

Está ubicada en la parte media de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, departamentos de Boyacá y Santander. La zona tiene un área de 4943,02 km<sup>2</sup> y exhibe estructuras como el Anticlinal de Arcabuco y las fallas de Boyacá y Soapaga (Figura 1).

## Contexto geológico

La cuenca Cordillera Oriental se define al este por la cuenca Llanos y al oeste por la cuenca del valle del Magdalena (Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006). Está superpuesta al basamento cristalino, compuesto por rocas metamórficas del Precámbrico al Paleozoico inferior y rocas intrusivas del Jurásico que afloran en zonas como los macizos de Quetame, Santander y Floresta (García-Delgado *et al.*, 2021). Además, afloran rocas sedimentarias de origen marino del Cretácico, la secuencia sedimentaria del Cenozoico y depósitos cuaternarios abundantes en la zona, principalmente sobre las unidades Cretácico y Cenozoico, y a lo largo del sector entre las fallas de Boyacá y Soapaga (Velandia y Bermúdez, 2018).

En el área de estudio afloran rocas con edades desde el Triásico hasta el Cuaternario, donde predominan las formaciones sedimentarias depositadas en el Cretácico, y hacia el centro formaciones jurásicas y triásicas expuestas en el núcleo del anticlinal de Arcabuco (Figura 1C).



**Figura 1.** A. Localización de cuencas hidrográficas analizadas. B. Modelo de elevación digital ALOS a 30 m de resolución con fallas geológicas (Gómez *et al.*, 2015). C. Mapa geológico de la zona de estudio, modificado de Gómez *et al.* (2015), y distribución de edades termocronológicas existentes a lo largo de la zona de estudio (Parra *et al.*, 2009; Mora *et al.*, 2010; Ramírez-Arias *et al.*, 2012; Saylor *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2013; Guerrero-Moreno, 2018).

## Métodos y bases de datos

Para comprender la evolución del paisaje en el área de estudio se calcularon diferentes variables geomorfológicas (Tabla 1), que fueron extraídas a partir de los modelos de elevación digital (DEM por su sigla en inglés) para cada una de las cuencas de estudio, con una resolución de 30 m por píxel, descargados del sensor ALOS (<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>). Se emplearon los datos satelitales de precipitación promedio anual de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM, <https://people.geog.ucsb.edu/~bodo/TRMM/>) para un intervalo entre 1998 y 2009, con resolución de 4 km horizontales y 250 m verticales, para obtener las variables que involucran la red de drenaje, como el índice de empinamiento (ksn), índice del gradiente longitudinal del canal (SL *Stream-length gradient index*), humedad (WI), capacidad de transporte de sedimentos (STI) y erosión a corto plazo (TSP *Total Stream Power*, USP *Unit Stream Power* y SSP

*Shear Stream Power*) (Tabla 1), con el fin de evidenciar el efecto de la lluvia en el modelamiento de las cuencas.

Los datos sísmicos fueron utilizados con el propósito de calcular la energía sísmica liberada (SE), la deformación (SSR) y el levantamiento sísmico (U) (Tabla 2); dicha información se recopiló del catálogo del Servicio Geológico Colombiano (<http://bdrsnc.sgc.gov.co/paginas1/catalogo/index.php>). Finalmente, para el cálculo de los índices de erosión a largo plazo, mediante la aplicación del código numérico Age2Edot (Brandon *et al.*, 1998; Ehlers *et al.*, 2005), se compilaron los datos termocronológicos existentes (Parra *et al.*, 2009; Mora *et al.*, 2010; Ramírez-Arias *et al.*, 2012; Saylor *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2013; Guerrero-Moreno, 2018). Para cada una de las métricas calculadas, y en especial los índices de erosión, no se tomaron en cuenta las incertidumbres asociadas a estos. Sin embargo, Bermúdez *et al.* (2013) muestran que cuando se incluyen las incertidumbres se mantienen las relaciones encontradas.

**Tabla 1.** Parámetros geomorfométricos calculados para la zona de estudio a partir del modelo de elevación digital y la base de datos de precipitación.

| Parámetro   | Ecuación  | Referencia  |
|---|---|---|
| Relieve local (R)                                     | $R = \text{DEM} - \min(\text{DEM})$<br>Es el volumen de material removido. Se usaron radios de 0,5; 1 y 1,5 km en ArcGIS 10.5   | (1)<br>Small y Anderson (1998)<br>Champagnac <i>et al.</i> (2007) |
| Integral hipsométrica (IH)                            | $IH = \frac{\text{Altura media} - \text{Altura mínima}}{\text{Altura máxima} - \text{Altura mínima}}$<br><0,3 = paisajes seniles<br>0,3-0,5 = paisaje en equilibrio<br>>0,5 = paisaje juvenil   | (2)<br>Strahler (1957)<br>García-Delgado y Machuca (2019)         |
| Índice de Hack o gradiente longitudinal de canal (SL) | $SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} * L$<br>$\Delta H$ es el cambio en la elevación de la sección, $\Delta L$ es la longitud de esta y L es la longitud total desde el punto medio de la sección de interés hasta el punto más alto del canal aguas arriba. La distancia de banda (DL) que se utilizó fue de 150 m, y un radio de 450 m                                   | (3)<br>Hack (1973)  |
| Índice de empinamiento (ksn)                          | $Ksn = \frac{S}{A^{-\theta}}$<br>ksn y $\theta$ son el índice de empinamiento y la concavidad, respectivamente. Este índice fue calculado usando la herramienta TopoToolBox de Matlab R2017b; fue necesario calcular el área de acumulación de flujo teniendo en cuenta el patrón de precipitación de la zona y la pendiente a partir del modelo de elevación digital | (4)<br>Flint (1974)<br>Kirby y Whipple (2012)                     |

Continuación Tabla 1.

| Parámetro   | Ecuación   | Referencia  |
|---|--|---|
| Índice de humedad (WI)                                    | $WI = Ln * \frac{A_s}{\tan\beta}$ (5)<br>$A_s$ es el área de drenaje de acumulación y $\beta$ es la pendiente  | Roa-Lobo y Kamp (2012)                                    |
| Índice de la capacidad de transporte de sedimentos (STI)  | $STI = (m + 1) \left(\frac{A_s}{22,13}\right)^m \left(\frac{\sin\beta}{0,0896}\right)^n$ (6)<br>$A_s$ y $\beta$ se definen igual al parámetro anterior   | Moore y Burch (1986)<br>Goulsbra <i>et al.</i> (2014)     |
| Índice de erosión potencial a corto plazo (TSP, USP, SSP) | $El_p = k \sum [(A_p)P]^m S^n$ (7)<br>$A_p$ es el área de píxel y $P$ la precipitación<br>$k$ es el factor de erodabilidad, se asume $k=1$ .<br>Si $m = n = 1$ , se obtiene la potencia total de flujo (TSP). Si $m = 1/2$ y $n = 1$ , se obtiene la potencia por unidad del ancho del canal (USP). Si $m = 1/3$ y $n = 2/3$ se obtiene la potencia por poder de cizalla (SSP) | Finlayson <i>et al.</i> (2002)<br>Tucker y Whipple (2002) |

Tabla 2. Parámetros sísmicos calculados para la zona de estudio a partir de la base de datos sísmológica.

| Parámetro                 | Ecuación   | Referencia                 |
|---------------------------|--|----------------------------|
| Energía sísmica (SE)      | $\log_{10}(SE) = bMl + a$ (8)<br>Los parámetros $a$ y $b$ de esta relación se calculan mediante regresión lineal de la relación magnitud-frecuencia de los sismos. El área se dividió en 4 y 16 cuadrantes con el propósito de analizar su variabilidad espacial. $Ml$ es la magnitud local  | Gutenberg y Richter (1954) |
| Deformación sísmica (SSR) | $\epsilon_H = \left(\frac{1}{2\mu\Delta V\Delta t}\right) \left(\frac{b10^{a+9,1}}{1,5-b}\right) (10^{(1,5-b)M_{max}})$ (9)<br>$a$ y $b$ se derivan de la ecuación<br>$M_{max}$ es la magnitud máxima observada; $\mu$ es el módulo de Young; $\Delta V$ es el volumen de la corteza y $\Delta t$ es el periodo de tiempo de la base de datos sísmológicos | Braun <i>et al.</i> (2009) |
| Levantamiento sísmico (U) | $u = h_c D S_v \left(1 - \frac{\rho_c}{\rho_m}\right)$ (10)<br>$h_c$ es el espesor de la corteza y $\rho_c$ y $\rho_m$ son las densidades medias de la corteza y el manto, respectivamente   | Braun <i>et al.</i> (2009) |

### Precipitación

Para este agente modelador se evaluaron los datos de la Misión de Medidas de Lluvias Tropicales de la NASA (*The Tropical Rainfall Measuring Mission* o TRMM) y los datos libres del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM; disponibles en <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>) para cada una de las 17 estaciones meteorológicas (Tabla 3). Para determinar el periodo de análisis de estos datos se tuvo en cuenta el tiempo de funcionamiento de las estaciones y aquellas que se

encuentran dentro y fuera de la zona de estudio para tener mejor cobertura de información.

Finalmente, se resuelve utilizar los datos TRMM (Bookhagen y Strecker, 2008), los cuales se encuentran calibrados para ciertas estaciones en tierra, con el propósito de realizar los diferentes mapas con el patrón de precipitación (Tabla 1), a razón de que el número de estaciones del IDEAM no es suficientemente denso para crear una cobertura e ilustrar las condiciones reales de precipitación de todo el sector.

**Tabla 3.** Valor promedio anual (mm) de precipitación del periodo 1988-2001 para algunas estaciones meteorológicas del IDEAM que se encuentran dentro y en los alrededores del área de estudio.

| Estación           | Código   | Norte    | Este     | Altitud | Precipitación anual |
|--------------------|----------|----------|----------|---------|---------------------|
| Sena               | 24030940 | 636663   | 731684,4 | 2500    | 671,93              |
| Encino             | 24020040 | 678869,9 | 710471,4 | 1814    | 3106,1              |
| Susa               | 24030370 | 684530   | 739590,3 | 380     | 1261,2              |
| Landázuri          | 23125130 | 687825,9 | 631774,8 | 935     | 3075,5              |
| Páez               | 35080050 | 563641,7 | 715818,1 | 1350    | 2997,6              |
| Villapinzón Granja | 21201640 | 581995,1 | 656160,6 | 2745    | 705,71              |
| Ubaté Granja       | 24011090 | 588978,5 | 633914,8 | 2555    | 656,5               |
| Ramiriquí          | 35070010 | 597080,7 | 684706,6 | 2360    | 1013,7              |
| Jenesano           | 35070220 | 598965,9 | 680967,1 | 2110    | 864,24              |
| Tres Esquinas      | 24010690 | 632064,3 | 651338,7 | 2600    | 1311,8              |
| Simijaca           | 24010150 | 609303,6 | 625869,9 | 2590    | 783,82              |
| Pesca              | 24030120 | 610824,3 | 713051,3 | 2678    | 685,07              |
| Las Cintas         | 35190010 | 620981,1 | 736198,5 | 3400    | 1135,2              |
| San Pedro Iguaque  | 24010830 | 623637,8 | 671618,3 | 2985    | 823,03              |
| Los Azulejos       | 24030820 | 626337,5 | 698235,8 | 2780    | 828,64              |
| Chámeza            | 35190030 | 575643,2 | 732451,7 | 180     | 3617,1              |
| Duitama            | 24030350 | 644797   | 716509,3 | 2540    | 843,48              |

### Base de datos sísmológica

Se recopilamos 559 datos de sismicidad para un periodo comprendido entre 1993 y 2017, donde no se tienen datos para el año 2000; por tanto, se cuenta con 23 años de información sísmológica. Además, solo se consideraron los sismos con profundidad menor o igual a 15 km (Bermúdez *et al.*, 2013), con el fin de analizar su aporte a la deformación vertical. En la cuenca Chicamocha, que se encuentra limitada al este por la Falla de Soapaga, se presentaron 5 sismos de mayor magnitud entre 3,3 a 4,3 de magnitud local (MI).

La Figura 2A muestra la distribución de los sismos, y en la Figura 2B, la gráfica de magnitud (MI) vs. frecuencia con que se presentaron estos sismos en el intervalo de tiempo mencionado.

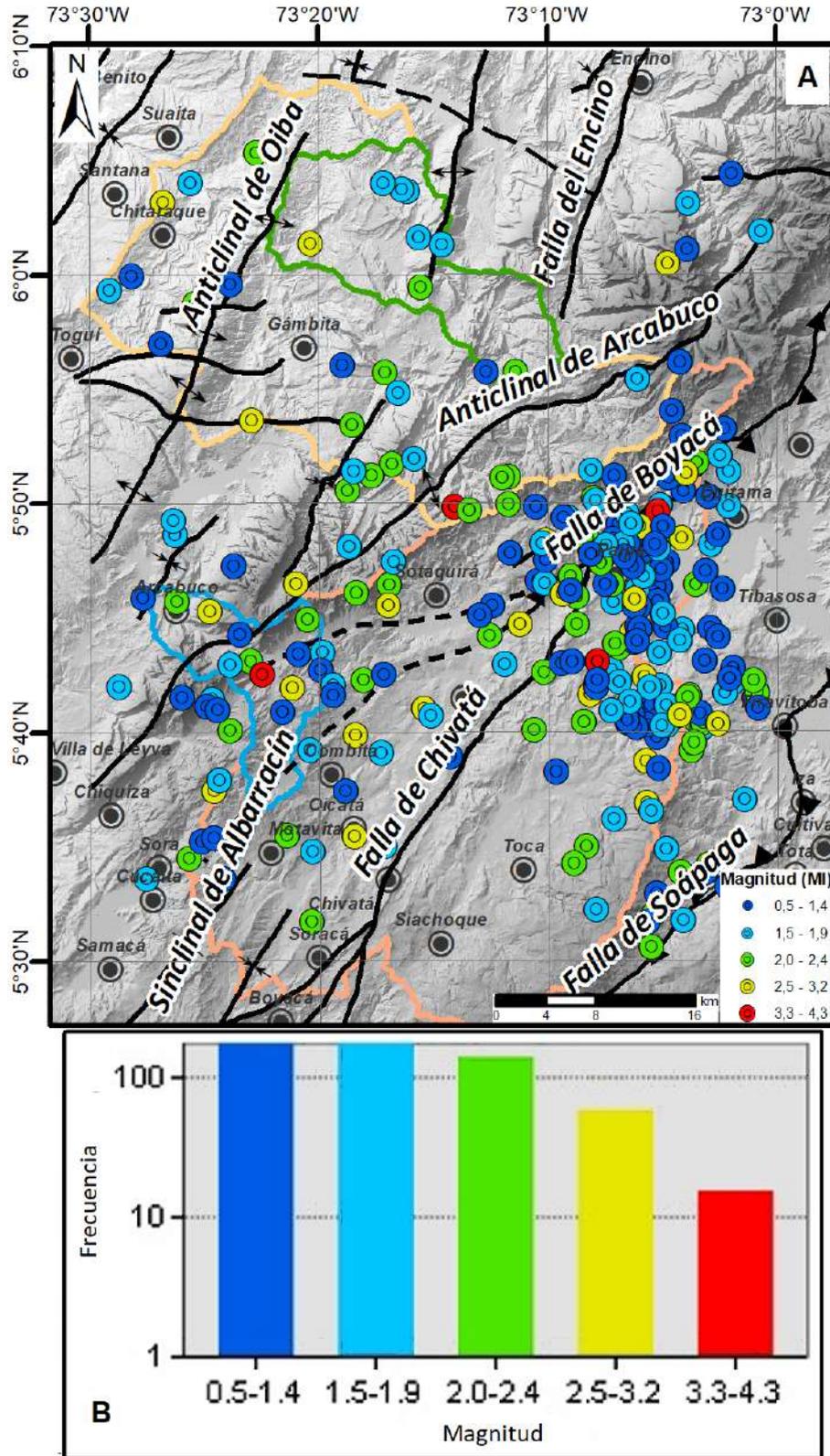
### Base de datos termocronológicos

La termocronología estudia la evolución tectonotérmica de una región del planeta (Braun *et al.*, 2006). Se basa en el cálculo de las edades de los últimos eventos tectonotérmicos que registran los minerales al pasar por una superficie de temperaturas llamada temperatura de cierre (Dodson, 1973). Entre los principales sistemas termocronológicos de baja temperatura se tiene: método de huellas de fisión (FT por su sigla en inglés) en circón y apatito, datación argón-argón  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y datación uranio-torio-helio ((U-Th)/He) en circón y apatito (Reiners y Brandon, 2006).

Para este trabajo se compilamos 21 datos termocronológicos de diferentes autores (Figura 1C); 10 edades se obtuvieron mediante el método de trazas de fisión en apatito (AFT), 6 edades por el método (U-Th)/He en circón (ZHe) y 5 edades del método (U-Th)/He en apatito (AHe) (Tabla 4).

### Estimación de tasas de erosión a largo plazo

A partir de la base de datos termocronológicos correspondientes a edades AFT, ZHe y AHe, es posible estimar las posibles tasas de exhumación o de erosión a largo plazo (km/Ma) a través del *software* Age2Edot, desarrollado por Brandon *et al.* (1998), donde se asume un estado de equilibrio topográfico (Willett y Brandon, 2002; Perne *et al.*, 2017). Los parámetros de entrada para esta rutina son: 1) el tipo de mineral fechado (apatito o circón) y el método utilizado (trazas de fisión o (U-Th)/He). Estos minerales y métodos se tomaron considerando la base de datos termocronológica recopilada en la zona de estudio. 2) La difusividad termal igual a 25 km<sup>2</sup>/Ma. 3) El espesor cortical del modelo de 40 km; estos dos últimos parámetros se tomaron como valores típicos para este tipo de cadenas montañosas (Brandon *et al.*, 1998), mientras que 4) la temperatura en la base del modelo, de 625 °C, fue retomada de Meléndez-Granados *et al.* (2021). De esta manera, se convirtió cada edad de los tres sistemas termocronológicos en tasas de erosión a largo plazo.



**Figura 2.** A. Ubicación de eventos sísmicos y localización de fallas y pliegues (Gómez *et al.*, 2015). B. Relación magnitud-frecuencia de los sismos obtenidos de la base de datos sismológica del Servicio Geológico Colombiano. La zona fue dividida en 4 y 16 cuadrantes para la comparación de los parámetros a y b de la ley de Gutenberg-Richter (Gutenberg y Richter, 1954).

**Tabla 4.** Edades termocronológicas (Ma) existentes en la zona de estudio: Edades por trazas de fisión en apatito (AFT), (U-Th)/He en circon (ZHe) y en apatito (AHe). En la [Figura 11](#) se ubica cada muestra con su respectivo código.

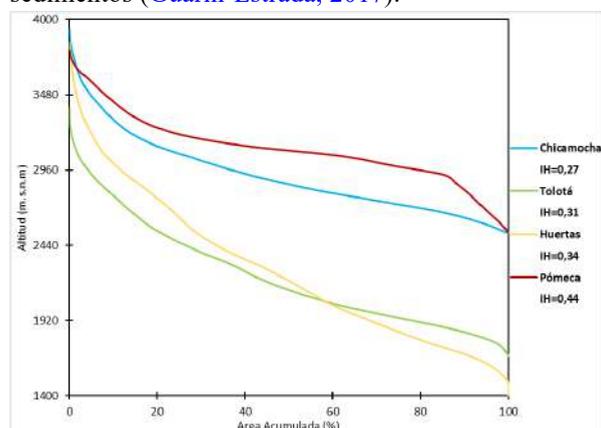
| Código      | Latitud | Longitud  | Elevación (m) | Formación o litología | Edad (Ma) | Error ± | Referencia                         |
|-------------|---------|-----------|---------------|-----------------------|-----------|---------|------------------------------------|
| RG-01       | 5,84998 | -73,0709  | 2959          | Rusia                 | 10,6      | 2,1     | Mora <i>et al.</i> (2010)          |
| RG-04       | 5,92501 | -73,08822 | 3619          | Montebel              | 19,8      | 2,1     |                                    |
| A45         | 5,9105  | -73,16198 | 2600          | Palermo               | 10,5      | 1,7     | Parra <i>et al.</i> (2009)         |
| A46         | 5,92502 | -73,08823 | 3574          | Montebel              | 19,9      | 2,1     |                                    |
| A47         | 5,84998 | -73,07092 | 2911          | Rusia                 | 10,6      | 2,1     |                                    |
| A08         | 5,61083 | -73,34845 | 3121          | Bogotá                | 46,8      | 3,3     |                                    |
| RG-06       | 5,61083 | -73,34847 | 3087          | Bogotá                | 46,8      | 3,3     | Ramírez-Arias <i>et al.</i> (2012) |
| PES1003     | 5,59882 | -73,00761 | 2773          | Socha Sup.            | 47,1      | 4,1     | Silva <i>et al.</i> (2013)         |
| JG-P2-05(3) | 5,54689 | -73,49726 | 2635          | Churuvita             | 5,47      | 1,16    | Guerrero-Moreno (2018)             |
| JG-P5-03    | 5,64432 | -73,50816 | 2407          | Arcabuco              | 5,88      | 1,9     |                                    |
| RG-06       | 5,6108  | -73,3485  | 3087          | Bogotá                | 139,7     | 154,7   | Ramírez-Arias <i>et al.</i> (2012) |
| z08BU38     | 6,1154  | -73,0774  | 1838          | Cuarzo                | 88,12     | 9,75    | Saylor <i>et al.</i> (2012)        |
| z08BU39     | 6,1045  | -73,0726  | 1945          | arenita               | 45,31     | 6,76    |                                    |
| z08BU40     | 6,0912  | -73,0685  | 2054          | Arenisca arcosa       | 32,11     | 3,49    |                                    |
| z08BU41     | 6,0689  | -73,0493  | 2379          |                       | 25,16     | 1,98    |                                    |
| z08BU42     | 6,0656  | -73,0487  | 2607          |                       | 61,1      | 38,6    |                                    |
| AM-09       | 5,8283  | -72,86    | 2426          | Une                   | 12,14     | 0,95    | Ramírez-Arias <i>et al.</i> (2012) |
| AM-10       | 5,8325  | -72,8677  | 2470          | Girón                 | 6,39      | 0,67    |                                    |
| RW-2        | 5,5833  | -72,8146  | 3085          | Chipaqué              | 5,76      | 0,34    |                                    |
| RW3b        | 5,5863  | -72,8348  | 3362          | Guadalupe             | 3,03      | 1,3     |                                    |
| T4-032      | 5,3043  | -73,18    | 1644          | Une                   | 3,9       | 1,08    |                                    |

## Resultados obtenidos

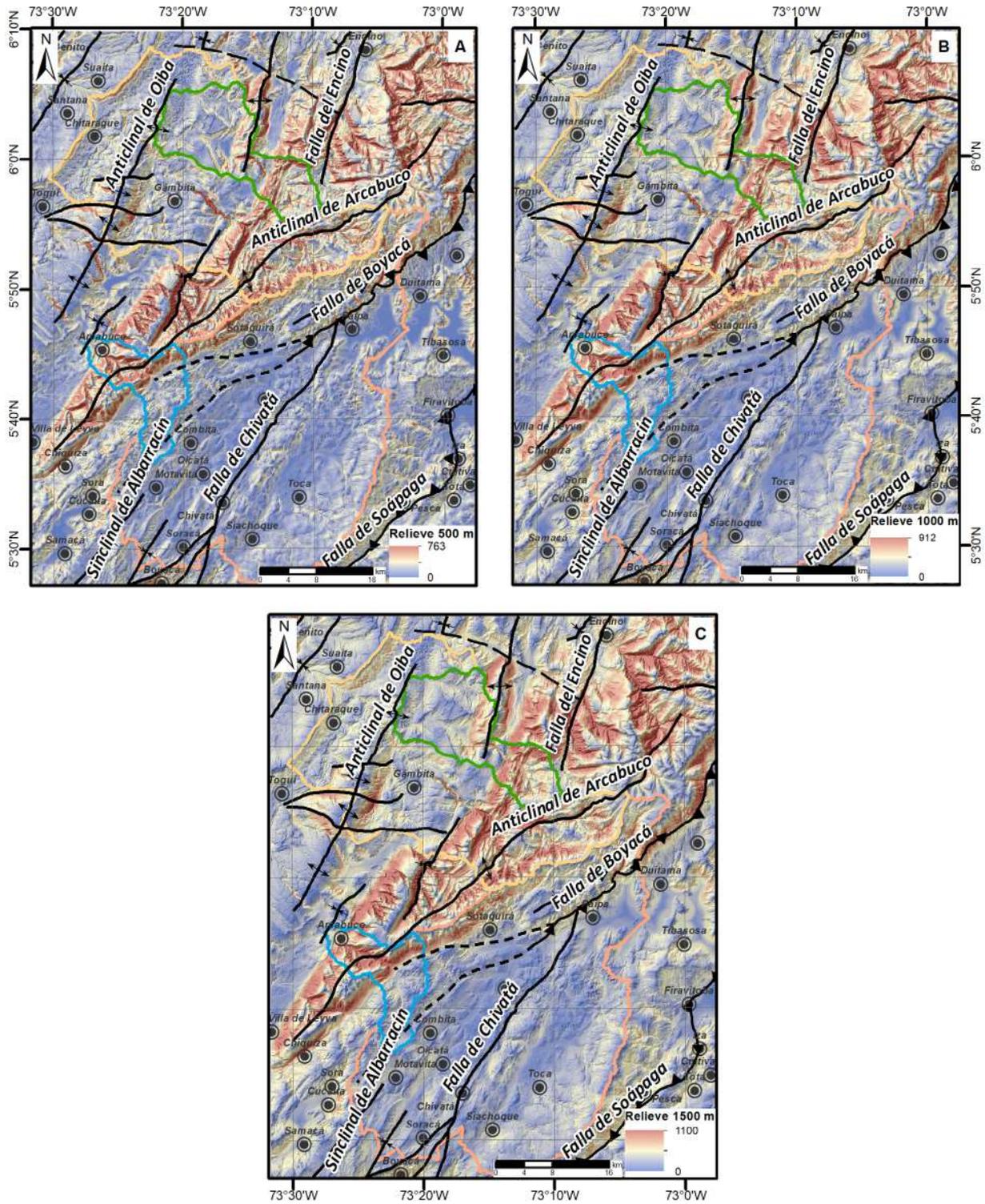
### Variabes geomorfológicas

Las variables geomorfológicas como la integral hipsométrica (IH) y el relieve local (R) fueron evaluadas para cada cuenca. Por su parte, las curvas hipsométricas y la IH ([Figura 3](#)), según [García-Delgado y Machuca \(2019\)](#), indican que en este sector la cuenca Chicamocha (curva cóncava) presenta un paisaje senil o altamente erosionado, mientras que Tolotá, Huertas y Pómeca (curvas en forma de S) exhiben un paisaje en equilibrio o maduro. Respecto al relieve local, la [Figura 4](#) exhibe los mapas calculados con radios de 0,5, 1 y 1,5 km, los cuales establecen evidencias de la incisión por parte de los ríos, donde el valor máximo lo registra la cuenca Pómeca con 316,63 para el radio de 1,5 km; lo anterior se correlaciona con la IH (0,44) de la misma cuenca, lo cual sugiere que el

río ha erosionado y transportado una gran cantidad de sedimentos ([Guarín-Estrada, 2017](#)).



**Figura 3.** Curvas hipsométricas de las cuatro cuencas hidrográficas evaluadas. Ver ubicación de las cuencas en la [Figura 1](#).

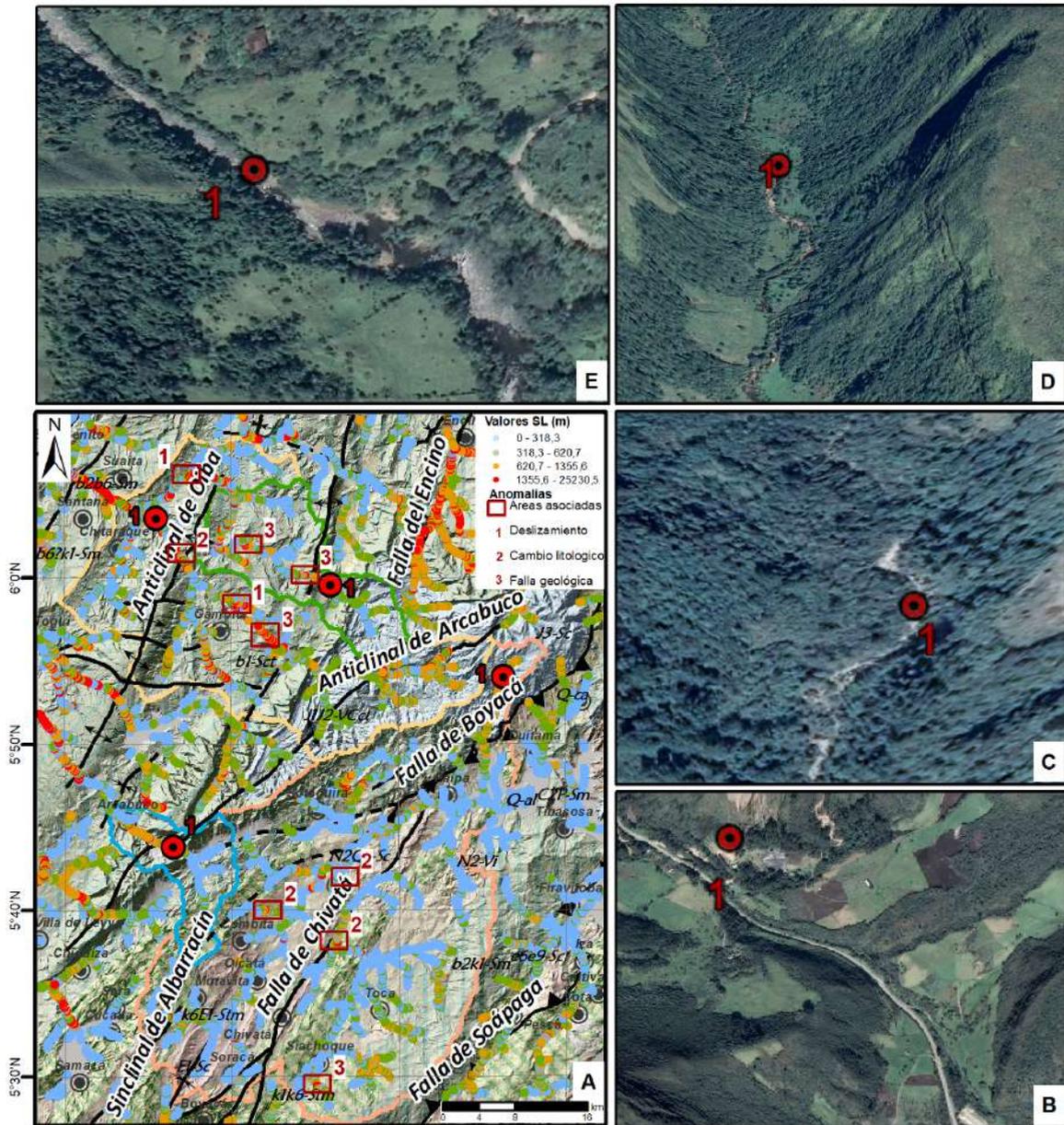


**Figura 4.** Mapas de relieve relativo calculado para: A. un radio de 0,5 km B. un radio de 1 km y C. un radio de 1,5 km. En cada mapa se muestran las principales estructuras de la zona de estudio, tomadas de [Gómez et al. \(2015\)](#).

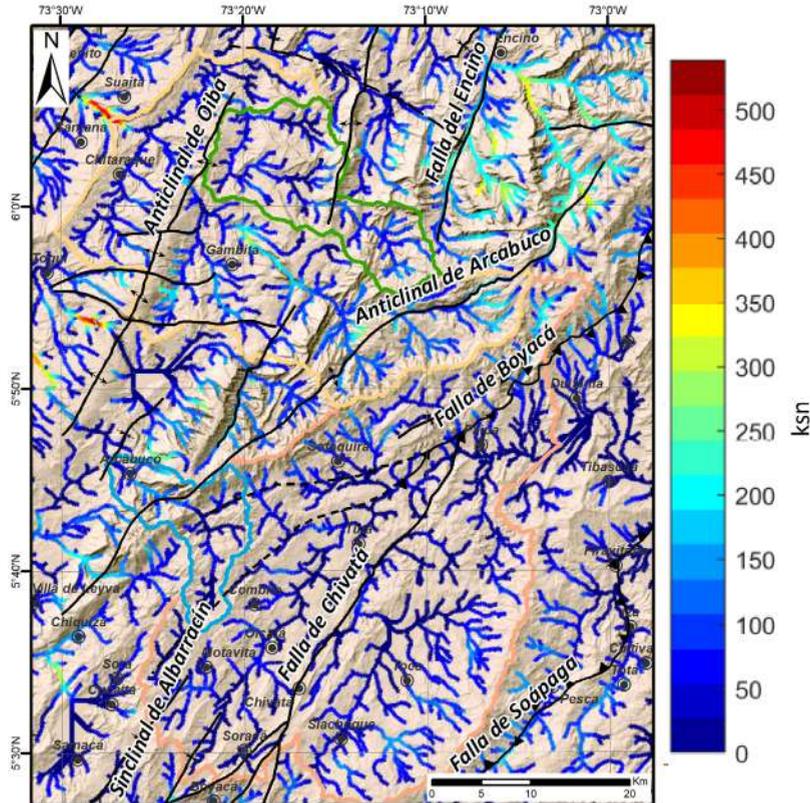
En la **Figura 5A** se presenta el índice SL; se consideran atípicos aquellos valores superiores a 1355 m, según la distribución por cuartiles (**Piacentini et al., 2020**). Se discriminan en total 14 anomalías, de las cuales el 29% están asociadas a fallas geológicas, el 42% se relacionan a deslizamientos y el 29%, a cambios litológicos a lo largo de los cauces principales. Las

**Figuras 5B-5E** ilustran algunos sectores donde ocurren deslizamientos dentro de las cuencas.

En la **Figura 6**, se presenta el mapa de índices ksn, el cual registra un valor máximo de 255 para la cuenca Huertas, mientras que las demás cuencas tienen un dato de 230; estos valores moderados para el índice de empinamiento.



**Figura 5.** Localización de las 14 anomalías identificadas en la zona de estudio. A. Anomalías relacionadas con cambios litológicos y fallas geológicas; en el mapa se muestran las principales estructuras de la zona de estudio, tomadas de **Gómez et al. (2015)**. B.C.D.E. Anomalías relacionadas con la acumulación de material deslizado en el lecho del canal.



**Figura 6.** Índice de empinamiento o ksn para las cuencas hidrográficas evaluadas. En el mapa se muestran las principales estructuras presentes en la zona de estudio, tomadas de Gómez *et al.* (2015).

### *Atributos secundarios del terreno*

Los mapas de atributos secundarios del terreno involucran el patrón de precipitación para su elaboración. Entre estos atributos, se encuentran el índice de humedad (WI) representado en la Figura 7A, donde las áreas planas concuerdan con los sectores más húmedos de todo el paisaje. El valor promedio máximo de WI se observa en las cuencas Tolotá, con un valor de 16,75, y Huertas, con un valor de 16,47; esto se debe a que estas presentan un bajo relieve en toda la sección. De la misma manera, para el índice de capacidad de transporte de sedimentos (STI), las cuencas Tolotá y Huertas (Figura 7B) exponen los valores promedio máximos de 421,94 y 404,62, respectivamente; lo anterior plantea un alto poder erosivo hacia el noroeste de la zona de estudio.

Por otro lado, los índices de erosión a corto plazo (EI), como el potencial total de flujo (TSP), se plasman

en la Figura 8A; el potencial por unidad del ancho del canal (USP), en la Figura 8B y el potencial por poder de cizalla (SSP) en la Figura 8C. El índice TSP presenta el promedio más alto para Huertas con  $2,4E10$   $W/m^2$  comparado con las demás cuencas. Así mismo, para el índice USP y SSP, la cuenca Huertas registra el mayor promedio en todo el sector, con valores de  $154715$   $W/m^2$  y  $2056$   $W/m^2$ , respectivamente.

### *Precipitación*

La precipitación promedio anual para la zona de estudio en el periodo 1998 a 2009 ha oscilado desde 0,4 m/año hasta 4,8 m/año. En cuanto a las cuencas hidrográficas, Pómecca y Chicamocha, ubicadas hacia el sur, tienen los valores de precipitación más bajos (1,02 y 1,1 m/año, respectivamente); por su parte, Huertas, con 2,5 m/año, y Tolotá, con valor de 3,2 m/año, registran la mayor precipitación en toda el área de estudio (Figura 9).

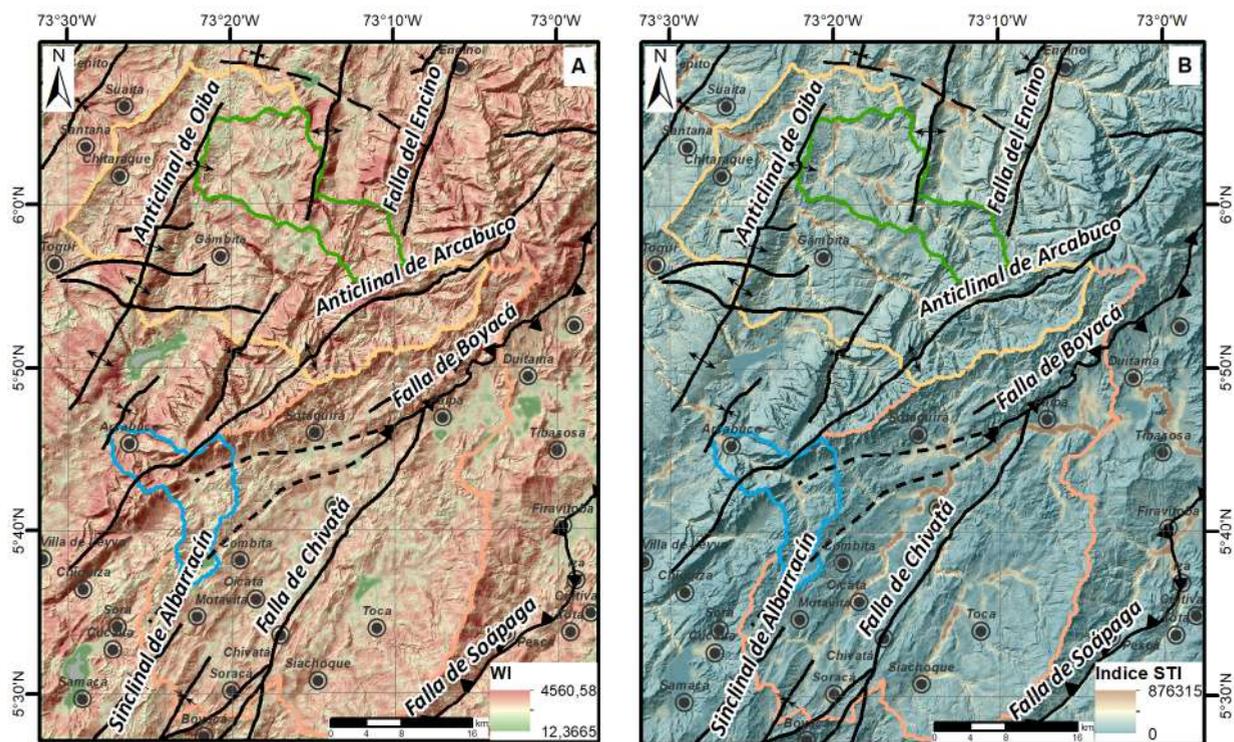


Figura 7. Atributos secundarios del terreno. A. Índice topográfico de humedad (WI). B. Índice de transporte de sedimentos (STI). En cada mapa se muestran las principales estructuras de la zona de estudio, tomadas de Gómez *et al.* (2015).

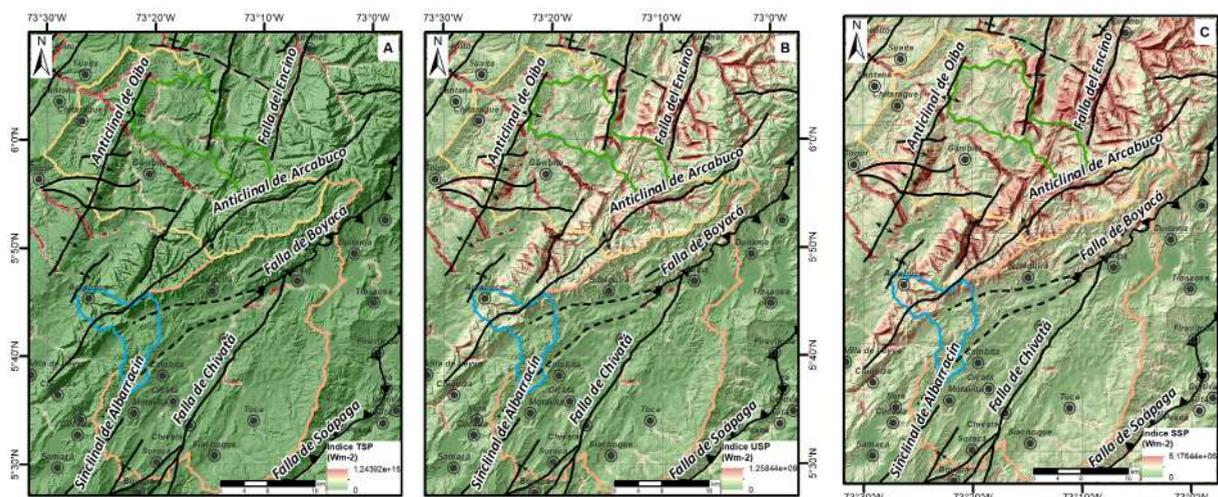
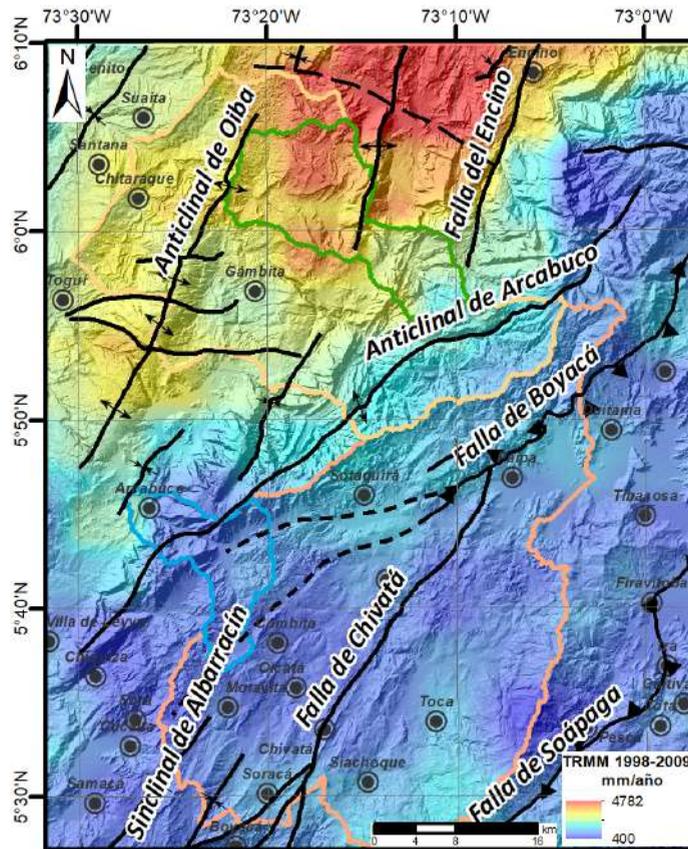


Figura 8. Índices de erosión a corto plazo. A. Poder de flujo total (TSP). B. Poder de flujo unitario (USP). C. Poder de flujo por cizalla (SSP). En cada mapa se muestran las principales estructuras de la zona de estudio, tomadas de Gómez *et al.* (2015).



**Figura 9.** Mapa de precipitación con datos TRMM 1998-2009. En el mapa se muestran las principales estructuras de la zona de estudio, tomadas de Gómez *et al.* (2015).

### Parámetros sismológicos

El análisis de este parámetro muestra que de manera particular la deformación sísmica (Figura 10C y 10D) y el levantamiento sísmico (Figura 10E y 10F) han sido mayor en el bloque delimitado por las fallas de Boyacá y Soapaga. Por su parte, la energía sísmica (Figura 10A y 10B) presenta los valores máximos en la cuenca Chicamocha, donde registra un valor promedio de  $8,3 \times 10^3$  J, este resultado se debe a que la cuenca se encuentra en las márgenes de las fallas principales en la zona de estudio.

### Tasas de erosión a largo plazo

Según la Figura 11, las tasas de erosión calculadas utilizando Age2Edot, a partir de las edades AFT, ZHe y AHe, muestran que el valor promedio para la cuenca Pómecha es el más alto en todo el sector, con un valor de 0,28 mm/año; por su parte, Huertas y Chicamocha

registran un valor de 0,20 mm/año; por último, la cuenca Tolotá, con 0,19 mm/año.

### Discusión de resultados

Este estudio busca establecer si el clima, el relieve o la tectónica, o la combinación de estos factores, están controlando la geomorfología actual en un sector de la cuenca Cordillera Oriental. A razón de lo anterior, se obtienen los valores promedio de cada parámetro evaluado en la presente investigación, los cuales son expuestos en la Tabla 5. Para facilitar la comprensión de la relación entre los datos calculados se elaboró un correlograma (Figura 12) que representa gráficamente la posible relación entre las variables. Para P, TSP, USP, SSP, WI y STI, los valores obtenidos son considerados empíricos debido a que para el cálculo de estos se empleó la variable precipitación.

Discriminación de la relación clima, relieve y tectónica en un sector de la cuenca Oriental, Cordillera Oriental de Colombia mediante geomorfología y termocronología cuantitativa

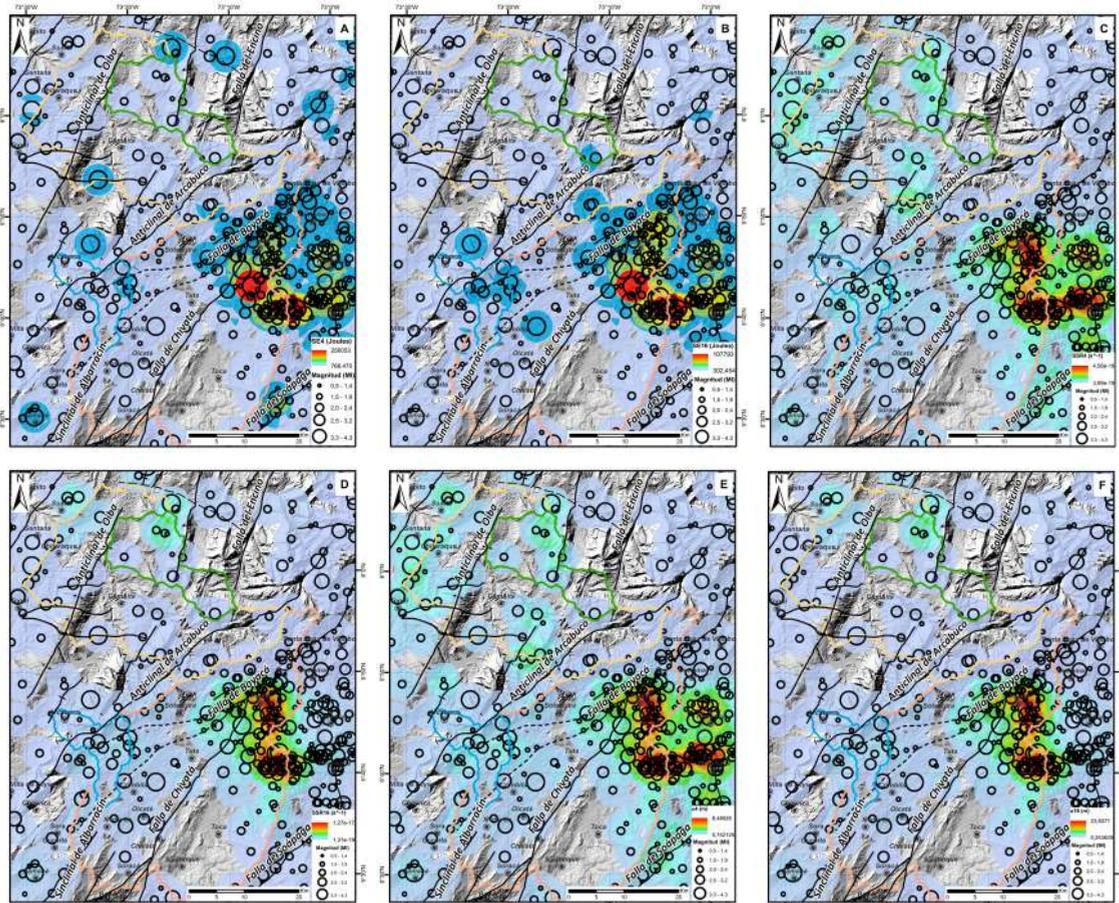


Figura 10. Parámetros sísmicos obtenidos al dividir la zona de estudio en 4 y 16 cuadrantes. A. y B. Energía sísmica. C. y D. Deformación sísmica. E. y F. Levantamiento sísmico. En cada mapa se muestran las principales estructuras de la zona de estudio, tomadas de Gómez *et al.* (2015).

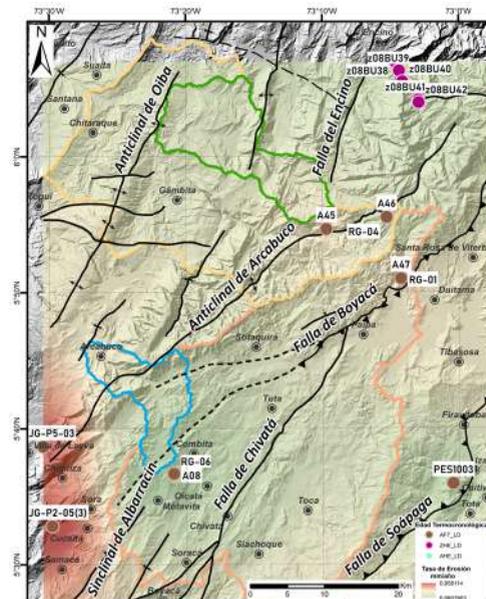


Figura 11. Distribución de las muestras e interpolación de las tasas de erosión derivadas a partir del código Age2edot. En el mapa se muestran las principales estructuras de la zona de estudio, tomadas de Gómez *et al.* (2015).

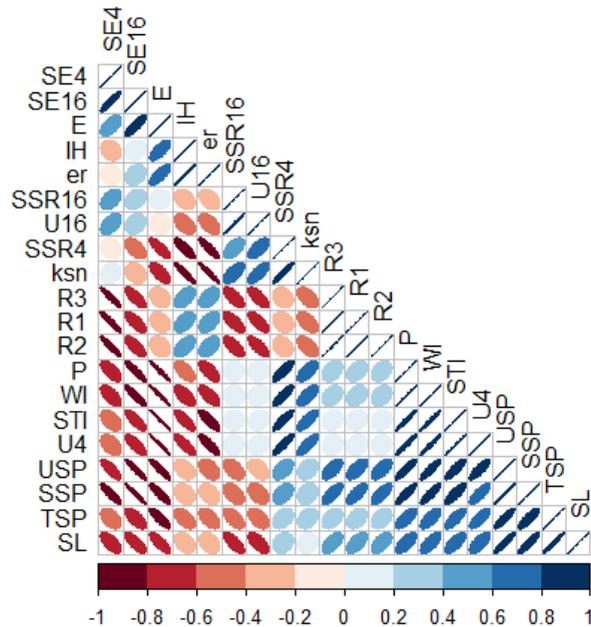
Según la **Figura 12**, la relación entre P y R ( $r=0,34$ ) indica de manera preliminar que el clima no sería un factor determinante del paisaje para el área de estudio. Contrario a lo anterior, los parámetros sísmicos (ES, SSR y U) tienen correlación significativa con la E, TSP, WI, STI, y ksn; por ejemplo, U4 con WI y STI registran valor de 0,97 y 0,99, respectivamente, esto sugiere un control tectónico reflejado en la incisión de los afluentes.

Los índices de erosión a corto plazo (TSP, USP y SSP) tienen alta relación con el índice SL ( $r \geq 0,8$ ), lo cual revela que la erosión producida por fallas activas, cambios litológicos y/o deslizamientos (**Figura 5**) está afectando los cauces de los ríos en el sector.

A una escala mayor de la deformación sísmica (SE16), junto con la elevación (E), se reporta una correlación

considerable ( $r=0,83$ ), así mismo, la E con la erosión a largo plazo (er) alcanza un  $r=0,74$ ; y sumado a lo anterior, las tasas de erosión a largo plazo (er) presentan la máxima correspondencia ( $r=1$ ) con la integral hipsométrica (IH). Estos resultados sustentan la idea de que los levantamientos de la superficie han favorecido a la remoción de material de las zonas más altas a zonas de menor elevación y, por lo tanto, están modelando la topografía en la zona de estudio.

Por otra parte, el índice ksn muestra una relación importante con los parámetros de deformación (SSR) y levantamiento sísmico (U), el cual es mayor para SSR4 y U4, con valores de 0,94 y 0,77, respectivamente. De esta manera, los datos anómalos del ksn son altamente influenciados por los movimientos sísmicos ocurridos dentro del área de interés.



**Figura 12.** Correlograma para las cuencas hidrográficas mostrando las correlaciones entre las distintas variables: E elevación, IH integral hipsométrica, R relieve local, P precipitación, TSP poder de flujo total con precipitación, USP poder de flujo unitario con precipitación, SSP poder de flujo por cizalla con precipitación, WI índice de humedad con precipitación, STI índice de transporte de sedimentos con precipitación, SE energía sísmica, SSR deformación sísmica, U levantamiento sísmico, SL índice del gradiente longitudinal del canal, ksn índice de empinamiento, er erosión a largo plazo. Las relaciones con mayor correlación están en dirección positiva. La barra de colores indica la fuerza de la correlación. SSR y U fueron calculados dividiendo la zona en 16 y 4 cuadrantes, respectivamente. Estos valores son denotados como SSR16, SSR4, U16 y U4.

**Tabla 5.** Valores promedio para cada una de las cuencas evaluadas en la zona de estudio. E= elevación (m); IH= integral hipsométrica; R1= relieve con radio 0,5 km; R2= relieve con radio 1 km; R3= relieve con radio 1,5 km; P= precipitación TRMM (m/año) para el período 1998-2009; TSP= poder de flujo total con precipitación (W/m<sup>2</sup>); USP= poder de flujo unitario con precipitación (W/m<sup>2</sup>); SSP= poder de flujo por cizalla con precipitación (W/m<sup>2</sup>); WI= índice de humedad con precipitación; STI= índice de transporte de sedimentos con precipitación; SE= energía sísmica (Joules); SSR= deformación sísmica (s<sup>-1</sup>); U= levantamiento sísmico (m); U4 y U16 se refiere al cálculo del levantamiento sísmico cuando la zona es dividida en 4 y 16 cuadrantes. Análogamente, SSR4 y SSR16 es la deformación sísmica calculada a partir de U4 y U16. SL= índice del gradiente longitudinal del canal (m); ksn= índice de empinamiento; er= erosión a largo plazo estimada a partir de edades ZHe, AHe y AFT. Ver localización de las cuencas hidrográficas en la [Figura 1](#).

| Cuenca     | E    | IH  | R1  | R2  | R3  | P     | TSP     | USP    | SSP  | WI   | STI   | SE4  | SSR4  | U4  | SE16 | SSR16 | U16 | SL  | ksn | er   |
|------------|------|-----|-----|-----|-----|-------|---------|--------|------|------|-------|------|-------|-----|------|-------|-----|-----|-----|------|
| Tolotá     | 2183 | 0,3 | 122 | 209 | 285 | 3,206 | 1,08E10 | 134638 | 1927 | 16,8 | 421,9 | 3566 | 4E-18 | 6,7 | 2618 | 5E-18 | 9,9 | 409 | 150 | 0,19 |
| Pómeca     | 3073 | 0,4 | 138 | 237 | 316 | 1,025 | 2,4E9   | 80615  | 1432 | 15,6 | 282,6 | 4372 | 2E-18 | 3,5 | 3916 | 3E-18 | 4,7 | 346 | 145 | 0,28 |
| Huertas    | 2209 | 0,3 | 132 | 224 | 303 | 2,576 | 2,4E10  | 154715 | 2057 | 16,5 | 404,6 | 4071 | 3E-18 | 6,3 | 2961 | 2E-18 | 3,5 | 575 | 148 | 0,2  |
| Chicamocha | 2886 | 0,3 | 75  | 130 | 179 | 1,109 | 4,08E9  | 55149  | 1049 | 15,7 | 323,8 | 8307 | 3E-18 | 4,6 | 4948 | 5E-18 | 10  | 293 | 149 | 0,2  |

## Conclusiones

La discriminación de los agentes modeladores del paisaje mediante el uso de geomorfología cuantitativa resulta útil para determinar la variable responsable de esculpir el relieve en un sector en la Cordillera Oriental de Colombia. Para el área de estudio se establecieron cuatro cuencas hidrográficas, de las cuales Chicamocha se encuentra en estado senil y Huertas, Tolotá y Pómeca están en equilibrio.

Por su parte, los índices de erosión a corto plazo (TSP, USP y SSP) tienden a ser mayores para el norte de la zona en la cuenca Huertas, lo cual indica un alto poder erosivo en todo este sector durante un tiempo prolongado.

Existe una correlación significativa entre la IH, elevación y erosión a largo plazo teniendo en cuenta que la curva hipsométrica muestra con claridad el comportamiento del relieve y su transformación debido a la erosión y tectónica.

Asimismo, hay una relación transitiva entre el relieve y los parámetros sísmicos, ya que el relieve se relaciona con el parámetro ksn, y este a su vez se relaciona con los parámetros sísmicos, pero esta correlación es débil debido a que la ventana de tiempo de observación de los sismos (1998-2021) es muy corta.

El relieve se correlaciona con las tasas de erosión a corto plazo con valores superiores a 0,6, esto significa que la zona hoy en día experimenta una importante erosión. El hecho de que la correlación entre relieves y tasas de erosión a largo plazo sea débil (<0,5) se podría deber a la insuficiencia de datos termocronológicos, lo cual impide extrapolar la influencia de la exhumación sobre el relieve actual.

Otra relación importante se da entre el ksn y los parámetros de deformación (SSR) y levantamiento sísmico (U), así las anomalías de ksn son directamente atribuidas a movimientos sísmicos ocurridos dentro del área de interés.

El análisis de los parámetros sísmicos como energía sísmica, deformación sísmica y levantamiento sísmico permitieron discriminar una zona activa tectónicamente entre las fallas de Boyacá y Soapaga.

Finalmente, el Anticlinal de Arcabuco corresponde a la estructura geológica que ocupa una mayor área

en la zona de estudio, y su alto índice de erosión está relacionado con la deformación sísmica, el levantamiento sísmico y las abruptas pendientes que se presentan en ese sector.

## Agradecimientos

Al financiamiento proporcionado por MINCIENCIAS-ANH a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), bajo el contrato número 80470-038-2023, código 110993194496, titulado “Aplicación de modelado inverso termocinémico 3D, métodos bayesianos y data mining usando computación paralela de alto rendimiento (HPC) para el análisis de cuencas petrolíferas en Colombia”.

## Referencias

- Bermúdez, M.A.; Van der Beek, P.A.; Bernet, M. (2013). Strong tectonic and weak climatic control on exhumation rates in the Venezuelan Andes. *Lithosphere*, 5(1), 3-16. <https://doi.org/10.1130/L212.1>
- Bookhagen, B.; Strecker, M. R. (2008). Orographic barriers, high-resolution TRMM rainfall, and relief variations along the eastern Andes. *Geophysical Research Letters*, 35(6). <https://doi.org/10.1029/2007gl032011>
- Brandon, M.T.; Roden-Tice, M.K.; Garver, J.I. (1998). Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, northwest Washington State. *GSA Bulletin*, 110(8), 985-1009. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1998\)110%3C0985:LCEOTC%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110%3C0985:LCEOTC%3E2.3.CO;2)
- Braun, J.; Van der Beek, P.; Batt, G. (2006). Quantitative thermochronology: Numerical methods for the interpretation of thermochronological data. Cambridge University Press.
- Braun, J.; Burbidge, D.; Gesto, F.N.; Sandiford, M.; Gleadow, A.J.W.; Kohn, B.P.; Cummins, P.R. (2009). Constraints on the current rate of deformation and surface uplift of the Australian continent from a new seismic database and low-T thermochronological data. *Australian Journal of Earth Sciences*, 56(2), 99-110. <https://doi.org/10.1080/08120090802546977>

- Champagnac, J.D.; Molnar, P.; Anderson, R.S.; Sue, C.; Delacou, B. (2007). Quaternary erosion-induced isostatic rebound in the western Alps. *Geology*, 35(3), 195-198. <https://doi.org/10.1130/G23053A.1>
- Dodson, M. (1973). Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40(3), 259-274. <https://doi.org/10.1007/BF00373790>
- Ehlers, T.A.; Chaudhri, T.; Kumar, S.; Fuller, C.W.; Willett, S.D.; Ketcham, R.A.; Brandon, M.T.; Belton, D.X.; Kohn, B.P.; Gleadow, A.J.W.; Dunai, T.J.; Fu, F.Q. (2005). Computational tools for Low-Temperature Thermochronometer Interpretation. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1), 589-622. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.22>
- Finlayson, D.P.; Montgomery, D.R.; Hallet, B. (2002). Spatial coincidence of rapid inferred erosion with young metamorphic massifs in the Himalayas. *Geology*, 30(3), 219-222. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030%3C0219:SCORIE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030%3C0219:SCORIE%3E2.0.CO;2)
- Flint, J.J. (1974). Stream gradient as a function of order, magnitude, and discharge. *Water Resources Research*, 10(5), 969-973. <https://doi.org/10.1029/wr010i005p00969>
- García-Delgado, H.; Machuca, S. (2019). Influencia de la actividad tectónica y volcánica reciente en la dinámica fluvial del río Anaime (Cajamarca, Cordillera Central de Colombia). *Boletín de Geología*, 41(3), 57-83. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n3-2019003>
- García-Delgado, H.; Villamizar-Escalante, N.; Bermúdez, M.A.; Bernet, M.; Velandia, F. (2021). Climate or tectonics? What controls the spatial-temporal variations in erosion rates across the Eastern Cordillera of Colombia? *Global and Planetary Change*, 203, 103541. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103541>
- Gómez, J.; Montes, N.E.; Nivia, A.; Diederix, H. (2015). Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano, 2 hojas. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/10.143.2015.935>
- Goulsbra, C.; Evans, M.; Lindsay, J. (2014). Temporary streams in a peatland catchment: pattern, timing and controls on stream network expansion and contraction. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(6), 790-803. <https://doi.org/10.1002/esp.3533>
- Guarín-Estrada, D.F. (2017). Influencia del patrón climático regional y la tectónica en la conformación del sistema de drenaje de la Serranía de San Lucas, Colombia: Análisis a partir del uso de la integral hipsométrica. Tesis de pregrado, Universidad de Los Andes, Colombia.
- Guerrero-Moreno, J.G. (2018). Pre-Andean tectonic events from Albian to Eocene in the middle Magdalena valley and situation of the western flank of the proto-eastern cordillera (Colombia). PhD Thesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Gutenberg, B.; Richter, C.F. (1954). Seismicity of the earth and associated phenomena. *MAUSAM*, 1(2), 174-176. <https://doi.org/10.54302/mausam.v1i2.4568>
- Hack, J.T. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the United States Geological Survey*, 1(4), 421-429.
- Hernández-Chaparro, D.R.; Bermúdez, M.A.; Hoke, G.; García-Delgado, H.; Machuca, S. (2021). Discriminación de la relación precipitación-tectónica como agentes modeladores del paisaje en los alrededores del Municipio Guayabetal, Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(2), A120121. <https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n2a120121>
- Kammer, A. (1997). Los pliegues del Sinclinal de Tunja: Análisis estructural y modelamiento geométrico. *Geología Colombiana*, 22, 3-25.
- Kammer, A.; Sánchez, J. (2006). Early Jurassic rift structures associated with the Soapaga and Boyacá faults of the Eastern Cordillera, Colombia: Sedimentological inferences and regional implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 412-422. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.006>

- Kirby, E.; Whipple, K.X. (2012). Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology*, 44, 54-75. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009>
- Meléndez-Granados, H.L.; Bermúdez, M.A.; García-Delgado, H.; Fonseca, H.; Marín-Cerón, M.I. (2021). Levantamiento orogénico alrededor del bloque Soapaga, Cordillera Oriental de Colombia: inferencias de modelado termocinémico, geomorfología y sismicidad. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(2), A141220. <https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n2a141220>
- Moore, I.D.; Burch, G.J. (1986). Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, 50(5), 1294-1298. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x>
- Mora, A.; Horton, B.K.; Mesa, A.; Rubiano, J.; Ketcham, R.A.; Parra, M.; Blanco, V.; García, D.; Stockli, D.F. (2010). Migration of Cenozoic deformation in the Eastern Cordillera of Colombia interpreted from fission track results and structural relationships: Implications for petroleum systems. *AAPG Bulletin*, 94(10), 1543-1580. <https://doi.org/10.1306/01051009111>
- Parra, M.; Mora, A.; Jaramillo, C.; Strecker, M.R.; Sobel, E.R.; Quiroz, L.; Rueda, M.; Torres, V. (2009). Orogenic wedge advance in the northern Andes: Evidence from the Oligocene-Miocene sedimentary record of the Medina Basin, Eastern Cordillera, Colombia. *GSA Bulletin*, 121(5-6), 780-800. <https://doi.org/10.1130/B26257.1>
- Patarroyo, P.; Moreno-Murillo, M. (1997). Nuevas consideraciones en torno al cabeceo del anticlinal de Arcabuco, en cercanías de Villa de Leyva – Boyacá. *Geología Colombiana*, 22, 27-34.
- Perne, M.; Covington, M.D.; Thaler, E.A.; Myre, J.M. (2017). Steady state, erosional continuity, and the topography of landscapes developed in layered rocks. *Earth Surface Dynamics*, 5(1), 85-100. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-85-2017>
- Piacentini, D.; Troiani, F.; Servizi, T.; Nesci, O.; Veneri, F. (2020). SLiX: A GIS Toolbox to Support Along-Stream Knickzones Detection through the Computation and Mapping of the Stream Length-Gradient (SL) Index. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 69. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020069>
- Ramírez-Arias, J.C.; Mora, A.; Rubiano, J.; Duddy, I.; Parra, M.; Moreno, N.; Stockli, D.; Casallas, W. (2012). The asymmetric evolution of the Colombian Eastern Cordillera. Tectonic inheritance or climatic forcing? New evidence from thermochronology and sedimentology. *Journal of South American Earth Sciences*, 39, 112-137. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.04.008>
- Reiners, P.W.; Brandon, M.T. (2006). Using thermochronology to understand orogenic erosion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1), 419-466. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125202>
- Roa-Lobo, J.; Kamp, U. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53(1), 109-126.
- Sarmiento-Rojas, L.F.; Van Wess, J.D.; Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383-411. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>
- Saylor, J.E.; Horton, B.K.; Stockli, D.F.; Mora, A.; Corredor, J. (2012). Structural and thermochronological evidence for Paleogene basement-involved shortening in the axial Eastern Cordillera, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 39, 202-215. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.04.009>
- Silva, A.; Mora, A.; Caballero, V.M.; Rodríguez-Forero, G.; Ruiz, C.; Moreno, N.; Parra, M.; Ramírez-Arias, J.C.; Ibáñez-Mejía, M.; Quintero, I. (2013). Basin compartmentalization and drainage evolution during rift inversion: evidence from the Eastern Cordillera of Colombia. *Geological Society, London, Special Publications*, 377, 369-409. <https://doi.org/10.1144/sp377.15>
- Small, E.E.; Anderson, R.S. (1998). Pleistocene relief production in Laramide Mountain ranges, western United States. *Geology*, 26(2), 123-126. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<0123:PRP ILM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<0123:PRP ILM>2.3.CO;2)

- Strahler, A.N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 913-920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>
- Tesón, E.; Mora, A.; Silva, A.; Namson, J.; Teixell, A.; Castellanos, J.; Casallas, W.; Julivert, M.; Taylor, M.; Ibáñez-Mejía, M.; Valencia, V.A. (2013). Relationship of Mesozoic graben development, stress, shortening magnitude, and structural style in the Eastern Cordillera of the Colombian Andes. *Geological Society, London, Special Publications*, 377(1), 257-283. <https://doi.org/10.1144/SP377.1>
- Tucker, G.E.; Whipple, K.X. (2002). Topographic outcomes predicted by stream erosion models: Sensitivity analysis and intermodel comparison. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B9), 1-16. <https://doi.org/10.1029/2001JB000162>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.020>
- Willett, S.D.; Brandon, M.T. (2002). On steady states in mountain belts. *Geology*, 30(2), 175-178. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0175:OSSIMB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0175:OSSIMB>2.0.CO;2)

---

---

Fecha de recibido: 15 de marzo de 2024

Fecha de aceptado: 31 de julio de 2024

---

---