

# **Morfometría y marcadores geomorfológicos del abanico aluvial asociado a la Quebrada Campanas, Antioquia, Colombia.**

Autores

Mateo Ramírez Calderón 201510011015

Juan Sebastián Tejada Vanegas 201510026015

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título como Geólogo

Director

Alejandro Beltrán Triviño, PhD.

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias de la Tierra

Geología

Universidad EAFIT

Medellín, Colombia

2020

## Tabla de contenido

Resumen .....	6
1. Introducción.....	6
2. Objetivos .....	7
2.1. Objetivo principal .....	7
2.2. Objetivos específicos .....	7
3. Contexto regional .....	8
3.1. Localización del área de estudio .....	8
3.2. Contexto geológico.....	9
3.2.1. Contexto tectono - geológico .....	9
3.4. Contexto geomorfológico.....	12
4. Marco Teórico.....	13
4.1. Morfometría .....	14
5. Metodología para la obtención y procesamiento de datos fotogramétricos .....	20
5.1. Obtención de datos fotogramétricos.....	20
5.2. Procesamiento de datos.....	22
6. Resultados .....	23
6.1. Mapa geomorfológico.....	28
6.2. Marcadores geomorfológicos .....	30
6.3. Índices morfométricos.....	36
6.3.1 Sinuosidad del frente de montaña.....	38
6.4. Índices geomorfológicos.....	39
6.4.1 Curva e integral hipsométrica (IH) .....	40
6.4.2. Índice de Asimetría de la cuenca de Drenaje (AF).....	41
6.4.3. Factor transversal de simetría topográfica .....	43
7. Análisis de los resultados .....	44
7.1. Cuenca hidrográfica de la Quebrada Campanas .....	44
7.2. Marcadores geomorfológicos .....	45
8. Discusión .....	46
9. Conclusiones .....	48
10. Recomendaciones .....	49
11. Bibliografía .....	49

## Lista de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio. ....	8
Figura 2. Mapa geológico a escala 1:25000, tomado de Escobar y Mesa (2020) .....	11
Figura 3. Índices y coeficientes de formas para clasificación de cuencas, tomado de gabilan .....	15
Figura 4. Diagrama explicativo de las curvas hipsométricas (Keller y Pinter, 2002) .....	17
Figura 5. Asimetría de la cuenca de drenaje (Keller y Pinter, 2002). .....	17
Figura 6. Ejemplo de cálculo del Factor transversal de simetría topográfica (TTSF) para el Río Anebá, Amazonas (Ibáñez, et al., 2014). .....	19
Figura 7. Frente de montaña tectónicamente activo asociado con una falla oblicua lateral derecha en el Desierto central Mojave de California. La línea blanca, gruesa y recta (Ls) representa la longitud del rango de acción de la falla. La línea delgada (Lmf) es la distancia a lo largo de la transición montaña-piedemonte (Bull, 2007).....	20
Figura 8. Gráfica donde cada punto representa la toma aérea de la fotografía (fuente propia).....	22
Figura 9. Modelo conceptual para la generación de todos los productos en Agisoft Metashape.....	23
Figura 10. Mapa y perfil topográfico del valle del río Arma a escala 1:5000. Fuente propia.....	25
Figura 11. A) Nube de puntos dispersa. B) Nube de puntos densa. ....	26
Figura 12. Nube de puntos densa clasificada en dos categorías: la primera abarca árboles, casas y puntos altos (color blanco) y la segunda el terreno y puntos bajos representados por el color café. 27	
Figura 13. A) Modelo de elevación digital (DEM) generado en el software Agisoft Metashape. B) Ortofotografía generada en el software Agisoft Metashape. ....	28
Figura 14. Mapa geomorfológico a escala 1:5000, representa los ambientes morfogenéticos y sus unidades. Fuente propia.....	29
Figura 15. Cartografía del abanico aluvial. Fuente propia. ....	32
Figura 16. A) Ortomosaico del abanico aluvial. B) <b>A-L</b> diferentes líneas de segmentos que indican topografía irregular en la superficie del abanico. Fuente propia. ....	33

Figura 17. Traslapo de líneas longitudinales 1-4 (rojo) y transversales A-K (amarillo) representado por los puntos de color verde. ....	34
Figura 18. A-B) Para cada perfil longitudinal se ubico el contacto con los transectos., los puntos rojos son las ubicaciones de los cálculos de los ángulos de interés. ....	35
Figura 19. Mapa representativo de las líneas Ls y Lmf, fuente propia. ....	38
Figura 20. Clasificación de la actividad tectónica, tomado de Molano y Torres (2018).....	39
Figura 21. Cuenca hidrográfica de la quebrada Campanas, fuente propia. ....	40
Figura 22. Curva integral e hipsométrica de la cuenca hidrográfica de la quebrada Campanas. ....	41
Figura 23. Márgenes laterales del cauce principal, siendo AFi el margen izquierdo y AFd el margen derecho, fuente propia. ....	42
Figura 24. Se realizaron 4 cálculos del factor T a lo largo de la línea divisoria dentro de la cuenca, fuente propia.....	43

## Lista de tablas

Tabla 1. Descripción cronológica de unidades.....	9
Tabla 2. Descripción cronológica de fallas en la zona. ....	11
Tabla 3. Características comparativas entre el DEM satelital ALOS PALSAR y el DEM RPA.....	14
Tabla 4. Clasificación de las cuencas según su tamaño .....	16
Tabla 5. Cartografía disponible de la zona de estudio .....	21
Tabla 6. Datos relevantes del procesamiento .....	23
Tabla 7. Errores de posicionamiento de las cámaras.....	24
Tabla 8. Ángulos entre los transectos para cada perfil longitudinal.....	35
Tabla 9. Índices morfométricos.....	37
Tabla 10. Relación abanico cuenca .....	37
Tabla 11. Valores y resultado del cálculo de la Sinuosidad del frente de montaña. ....	38
Tabla 12. Valores de AFd y AFi .....	42
Tabla 13. Resultado del promedio del factor T. ....	44

## **Resumen**

El abanico aluvial de la quebrada Campanas, cuya corriente desemboca en el río Arma, se ha considerado un marcador geomorfológico de gran interés ya que, debido a su morfología y el contexto geológico de la zona, sugiere una génesis asociada a la falla del río Arma atribuido a la tectónica activa de la cordillera central. es por esto se realizó un análisis por medio de productos digitales como la ortofotografía, modelado 3D y el DEM generados por Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS) con el fin de obtener resultados detallados tanto de la morfometría del abanico como de los índices geomorfológicos de la subcuenca de la quebrada campanas, lo cual finalmente dichos resultados confirman la relación entre la formación del abanico y la actividad tectónica

**Palabras claves:** Abanico aluvial, marcador geomorfológico, índices geomorfológicos y RPAS.

### **1. Introducción**

La distribución regional de eventos neotectónicos y su relación morfotectónica ha sido observada por muchos autores en diferentes partes de Suramérica (Mon, 1971), donde la cordillera de los Andes es producto de la interacción entre el levantamiento de la roca y los procesos erosivos (Pérez Peña, 2009).

La geomorfología tectónica estudia la modificación topográfica del terreno la cual deja remanentes preservados que permiten conocer los eventos de deformación tectónica a escalas intermedias comprendiendo desde el Holoceno- hasta el pleistoceno (Burbank y Anderson, 2001). Los marcadores geomorfológicos, como los abanicos aluviales o terrazas fluviales proveen información acerca de la superficie, esto es posible debido a que se conoce su geometría inicial (Burbank y Anderson, 2001) también las caracterizaciones morfoestructurales y los procesos de dinámica superficial pueden generar evidencias de tectónica reciente (Lascarro, 2018). Los análisis morfotectónicos brindan una valiosa información acerca de algunos rasgos en el relieve, los cuales son producidos por movimientos en el terreno, ya sea por fallas o por esfuerzos derivados (Valdivia, 2013), es

por esto que es importante delimitar y clasificar las unidades geomorfológicas, comprendiendo los procesos dinámicos que actuaron y observando modelos de depósito aluvial para así lograr una interpretación de la evolución de los relieves, identificando los factores y procesos que actuaron durante el Cuaternario tardío (Suvires, 2013).

En Colombia durante los últimos 25 años varios autores han llevado a cabo varios estudios que ponen en evidencia numerosos rasgos morfotectónicos a lo largo del país y un ejemplo son las evidencias del Sistema de Falla del Borde Llanero (Goosen, 1971; Page, 1986; Robertson, 1989 y 1995). También existen estudios más recientes que han señalado la estrecha relación entre la dinámica fluvial, procesos sedimentológicos y la actividad Neotectónica en el piedemonte llanero (Robertson, 1991 y 1992).

En este trabajo se caracteriza la morfometría de los marcadores geomorfológicos y los índices geomorfológicos de la cuenca hidrográfica de la quebrada Campanas, las cuales están ubicadas en el Valle del río Arma, haciendo posible el relacionamiento de la existencia de la actividad tectónica con la modificación de estas unidades, finalmente para la realización de este trabajo se aplicó la técnica de la fotogrametría y el procesamiento de programas para la realización de modelos 3D, modelos de elevación, ortofotos y curvas de nivel para los análisis anteriormente descritos, donde los productos digitales se generaron con un nivel de detalle de menos de 1cm/píxel para poder obtener resultados más precisos.

## **2. Objetivos**

### **2.1.Objetivo principal**

Determinar el control de la actividad neotectónica sobre la geomorfología de la zona de estudio, a partir del análisis de elementos morfoestructurales identificados digitalmente en ortofotografías, modelos de elevación digital (DEM), modelos 3D y 2D adquiridos por medio de RPAS en los puntos de interés ubicados en el valle del río Arma, Municipio de Abejorral, Colombia.

### **2.2.Objetivos específicos**

- Generar modelos 3D, 2D, modelos de elevación digital (DEM) y ortofotografías.
- Analizar e Interpretar los productos digitales.
- Identificar y delimitar elementos morfoestructurales.
- Realizar el mapa topográfico y geomorfológico.
- Caracterizar los marcadores geomorfológicos.

### 3. Contexto regional

#### 3.1. Localización del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada sobre la Cordillera Central de los Andes hacia su parte más septentrional, Aproximadamente a 95 km al sureste de la ciudad de Medellín - Antioquia, comprendiendo un área de 3.3 km<sup>2</sup> en jurisdicción de los departamentos de Antioquia (Este) y Caldas (Oeste) siendo la frontera de estos el río Arma el cual tiene una dirección NS y atraviesa la zona central del sitio de interés en el municipio de Abejorral (Figura 1).

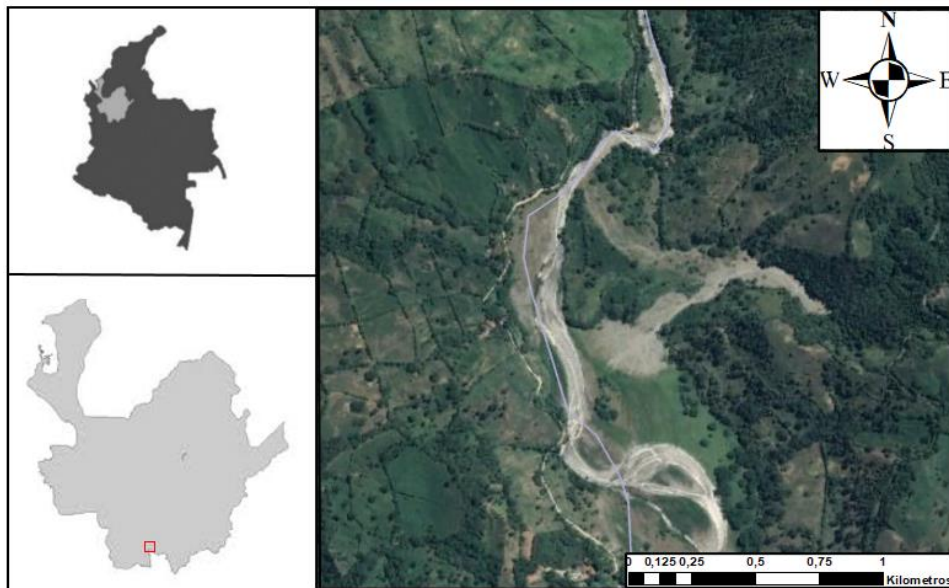


Figura 1. Localización del área de estudio, Municipio de Abejorral.

### 3.2. Contexto geológico

#### 3.2.1. Contexto tectono - geológico

El área de estudio comprende rocas de edades paleozoicas hasta cuaternarias, cuya historia geológica se enmarca por la presencia de cuerpos fallados esquistos actinolíticos del Complejo Cajamarca (González, 2001) debido al margen de subducción producida por la placa Nazca y suramericana, enmarcado dentro del sistema de fallas Romeral el cual afecta unidades litológicas entre el valle del río Cauca y la cordillera Central, tabla 1.

Tabla 1. Descripción cronológica de unidades

<b>Cronología Geológica</b>					
<b>Periodo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Edad</b>	<b>Datación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Bibliografía</b>
Cretácico	Formación Quebradagrande (Kv)	145Ma - 66Ma	Fosilífera	Compuesta por rocas ígneas y sedimentos intercalados en la base del conjunto volcánico	(Botero, 1963) (Grosse, 1926) (Hall, et al., 1972) (Radelli, 1967)
Oligoceno	Formación Amagá (Tos)	23Ma - 10Ma	Palinología	Areniscas intercaladas de arcillas	(Van der Hammen, 1968)
Mioceno	Formación Combia (Tmc)	10Ma +/- 5	K/Ar - Hornblenda	Rocas volcanosedimentarias,	(MacDonald, 1980)

K/Ar -	aglomerados, basaltos	(Restrepo et
Biotita	toleíticos, tobas	al., 1981)
K/Ar -	volcánicas, brechas,	(Van der
Roca total	andesitas.	Hammen,
		1958)
		(González,
		1976)

Cuaternario    Aluviones recientes    Holoceno    Suprayacen

---

Nota. Descripción cronológica de las unidades litológicas del área de estudio.

Además, en el mioceno tardío y plioceno se da el acercamiento y acreción del Bloque Chocó al margen continental del noroccidente colombiano; con esto se desarrolla un segundo sistema de fallas, con componente transpresional, que corresponde a la falla arma y con estructuras orientadas en sentido NW – SE (Sierra, 2006). Entre el paleoceno y oligoceno, se emplazan plutones y stocks, como el stock de Alisales, Acandí y el Batolito de Anchicayá, a causa de la acreción de la Cordillera Occidental (Toussaint, 1999).

La posterior intrusión de rocas volcánico-sedimentarias de Combia con el miembro inferior y superior de Amaga hacia los 10 – 6 Ma dejó remanentes Hipoabisales porfídicos representados en geoformas actuales de mayor relevancia como lo es el Sillón y el Cerro Tusa (Sierra et al, 2006).

Adicionalmente, en el área de estudio se evidencian depósitos cuaternarios y actuales asociados a la formación de terrazas, barras y abanicos aluviales, este último, generado por las elevadas pendientes y la dinámica fluvial (Figura 2).

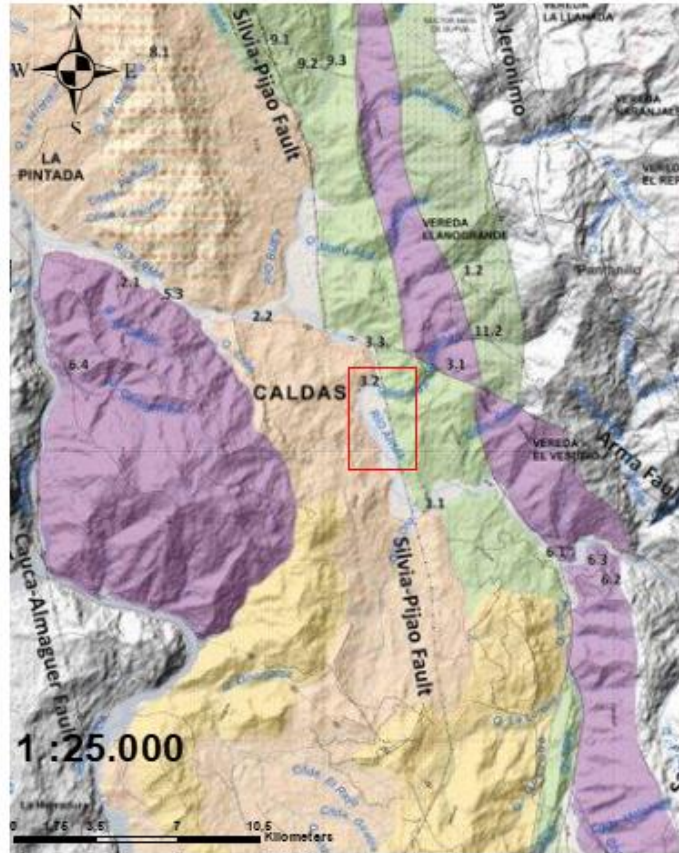


Figura 2. Mapa geológico a escala 1:25000, tomado de Escobar y Mesa (2020)

### 3.3. Geología estructural

Estructuralmente la zona de estudio se encuentra caracterizado por el sistema de fallas Cauca Romeral, como uno de los principales factores influyentes en la generación de lineamientos fisiográficos y desplazamientos de bloques tectónicos (Sierra 2006). Una de las principales fallas asociadas al sistema de fallas romeral es la falla Silvia-Pijao que tiene rasgos morfotectónicos como drenajes desplazados, silletas, lomos de obturación y de presión, entre otros (Paris y Romero, 1994).

Tabla 2. Descripción cronológica de fallas en la zona.

Cronología estructural					
Periodo	Nombre de la falla	Tipo de falla	Litología afectada	Edades relativas	Bibliografía

		Falla inversa	Rocas sedimentarias terciarias de las Formaciones Amagá y Combia.	23Ma - 10Ma +- 5Ma	(Sierra, 2006)
Mioceno	Cauca - Romeral	con componente lateral izquierdo			
	Silvia Pijao	Rumbo lateral derecha			(Paris y Romero, 1994)
Mioceno tardío - Plioceno	Arma		Rocas formación Amagá	5Ma - 2.5Ma	(Sierra, 2006)

---

Nota. Descripción cronología del sistema de fallas que afectan la zona de estudio.

### 3.4.Contexto geomorfológico

El territorio colombiano, ubicado hacia el extremo noroccidental del continente suramericano, se caracteriza por tener dos dominios geomorfológicos; los llanos orientales y la zona Andina, cuyas geoformas han sido el resultado de la interacción de procesos climáticos del trópico con la tectónica activa de los Andes (Hermelin, 2013). Siendo este último dominio, conformado por la presencia de corredores montañosos, el área de interés para el desarrollo de este trabajo.

Por lo tanto, para el caso de países tropicales como el nuestro, tanto la morfogénesis como la clasificación de la montaña han sido definidos según unos parámetros donde se ha correlacionado que a cada segmento, alto, medio y bajo de la montaña existe un ambiente modelador el cual influye en la génesis de geoformas en el paisaje, siendo el clima el que mayor influencia tiene, dependiendo de la altura, sobre los procesos endógenos del planeta, debido a que a menor altura, la red de drenaje es más densa a causa de una mayor cantidad de tributarios beneficiando el potencial hidrogravitatorio de estos sistemas fluviales (Flórez, 2002).

El área de trabajo se caracteriza por estar ubicado en el rango altitudinal de la montaña baja, donde existe un predominio morfogenético influenciado por un ambiente estructural, denudacional y fluvial, donde son representativos los procesos de dinámica de superficie que nos marcan modelaciones del terreno y así clasificar las geoformas más importantes de cada ambiente morfogenético como lo son los sistemas de colinas alineadas en un ambiente estructural que es referencia de zonas dominadas por los bloques tectónicos de rocas sedimentarias plegadas y los macizos ígneos. Las lomas, colinas y lomeríos en un ambiente denudacional donde la morfología está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte y finalmente las geoformas más características dentro de la zona de estudio que son las barras , terrazas aluviales y abanicos aluviales que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes y así mismo el ambiente estructural juega un papel importante en la formación del abanico aluvial.

Su situación geográfica y su historia geológica han producido un complejo conjunto de paisajes, donde las montañas altas y bajas permiten una gran diversidad de climas en el país, que incluyen montañas cubiertas de nieve y volcanes alcanzando los 5800 m sobre el nivel del mar (m s.n.m), sabanas tropicales y selvas amazónicas, pero también montañas subdesérticas valles y llanuras y costas cubiertas de manglares o áridas. (Hermelin, M. 2013).

#### **4. Marco Teórico**

Actualmente se ha incrementado el uso de herramientas tecnológicas de levantamiento topográfico como lo son los sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPA's), debido a su versatilidad, economía y alta resolución de imágenes que estos insumos proveen (Toulia, Kokinou, y Panagiotakis, 2018). Es por este motivo que este instrumento se ha utilizado para el levantamiento fotogramétrico y la obtención de imágenes con mayor resolución que permitan elaborar Modelos de Elevación Digital y análisis morfométricos de mayor precisión, ya que el Drone, a diferencia de un levantamiento tradicional generado por las líneas de vuelo o las imágenes satelitales, no requiere corregir los errores de vuelo de las

avionetas, y debido a la gran cantidad de fotos que este dispositivo genera, su resolución es superior a la de un sensor satelital (Pepe et al., 2018)(Anita et al 2018), ver tabla 3.

Tabla 3. Características comparativas entre el DEM satelital ALOS PALSAR y el DEM RPA.

<b>DEM</b>	<b>Resolución</b>	<b>Extensión</b>	<b>Altura toma de datos</b>
Satelital	12.5m/píxel	10000Ha	Satelital
RPA's	0.33cm/píxel	470Ha	326m

Nota. Comparación entre los modelos digitales de elevación entregados por cada dispositivo.

Además, este insumo es de fácil desplazamiento, el RPA obtiene información de la superficie más rápida que un sensor remoto LIDAR, brindando datos precisos y de una manera muy rápida para su posterior procesamiento, que, para el caso nuestro, dicho análisis de datos se enfocará al contexto de morfometría y fotogrametría.

#### **4.1.Morfometría**

La morfometría es un conjunto de herramientas de medición cuantitativo de la superficie, cuyo fin se basa en explicar a partir de datos numéricos los cambios del relieve, su origen y ambiente de formación (Flórez, 2002). Los parámetros morfométricos para cuantificar estos aspectos relacionados a la superficie terrestre abarcan factores como la longitud del cauce

principal al igual que el área, perímetro, longitud y el ancho de la cuenca hidrográfica (Calvache et al., 1977).

Al obtener estos datos, se procede al cálculo de índices como lo es el **coeficiente de compacidad (kc)** el cual relaciona el alargamiento o similitud de una cuenca con una circunferencia para determinar la cantidad de descarga que tienen sus tributarios según su distribución; **el factor de forma F** encargado de brindar información más acertada sobre la dinámica y comportamiento de las escorrentías superficiales, en caso de ser o no más susceptibles a la acumulación de estos escurrimientos y la susceptibilidad a la formación de escorrentías (Calvache et al., 1977); **el índice de alargamiento o elongación** describe la relación que hay entre el retardo de la precipitación y la crecida del cauce principal con la forma circular o elongada de la cuenca y finalmente **el índice de asimetría** se explicará más adelante.

PARÁMETRO	ECUACIÓN	INTERPRETACIÓN
<i>Índice de compacidad <math>K_c</math></i>	$K_c = 0,28 \times \left[ \frac{P}{\sqrt{A}} \right]$	<p><math>K_c</math> 1,00 – 1,25: Cuenca redonda a oval redonda.</p> <p><math>K_c</math> 1,25 – 1,50: Cuenca de oval redonda a oval oblonga.</p> <p><math>K_c</math> 1,50 – 1,75: Cuenca de oval oblonga a rectangular oblonga.</p>
<i>Factor de forma <math>F</math></i>	$F = \frac{A}{L^2}$	<p><math>F &gt; 1</math>: Cuenca achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas.</p> <p><math>F &lt; 1</math>: Cuenca alargada, baja susceptibilidad a las avenidas.</p>
<i>Índice de alargamiento <math>l_a</math></i>	$l_a = \frac{L_m}{l}$	<p><math>l_a &gt; 1</math>: Cuenca alargada.</p> <p><math>l_a \approx 1</math>: Cuenca achatada y por lo tanto el cauce principal es corto.</p>

Figura 3. Índices y coeficientes de formas para clasificación de cuencas, tomado de gavián S.f

Es importante detallar que, según el tamaño del área de la cuenca, esta se puede clasificar en tres maneras diferentes: grande, intermedia y muy pequeña (IDEAM 2010) (Tabla 4).

Tabla 4 Clasificación de las cuencas según su tamaño

<b>Clasificación de las cuencas según su tamaño</b>	
<b>Unidad hidrográfica</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>
Cuenca grande	>800
Cuenca intermedia	200 - 800
Cuenca pequeña	25 - 200
Cuenca muy pequeña	3 - 25

Nota. Se utiliza una clasificación de las cuencas para determinar el tipo de unidad hidrográfica dependiendo de su tamaño, Tomado de IDEAM 2010.

Además, existen otras técnicas de análisis donde se encuentran el diagnóstico de **curvas hipsométricas**; la cual a partir de la evaluación del terreno comprendido entre dos curvas de nivel y la sumatoria de otras más, permite obtener el porcentaje de madurez evolutiva de una cuenca, entre ellas si es joven, madura o relativamente reciente (Racca, 2007) (Figura 4).

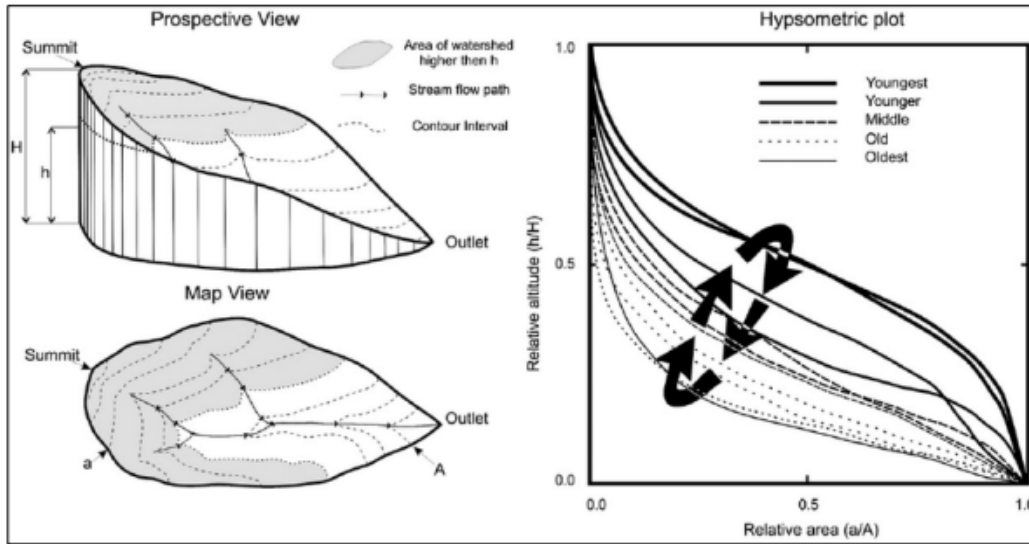


Figura 4. Diagrama explicativo de las curvas hipsométricas (Keller y Pinter, 2002)

Así mismo, la **asimetría de la Cuenca de Drenaje (AF)**, permite relacionar el grado de basculamiento de una cuenca con la tectónica activa de la región (Quijano 2014) (figura 5).

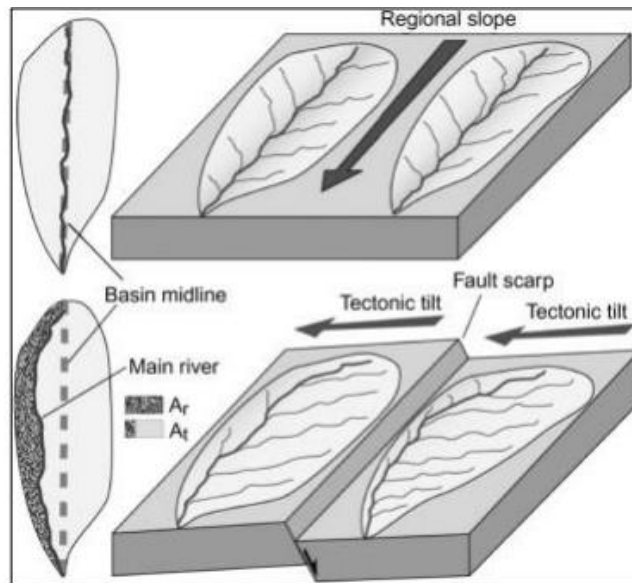


Figura 5. Asimetría de la cuenca de drenaje (Keller y Pinter, 2002).

Por otro lado, teniendo en cuenta la diferencia de parámetros espaciales como lo es el área de la cuenca (AR) sobre el área total de la cuenca (At) y a su vez ambos multiplicados por 100, es posible hallar dicho porcentaje de asimetría (Keller y Pinter, 2002 citado en Oviedo Reyes, 2015), de acuerdo con la siguiente formula:

$$AF = 100\left(\frac{Ar}{At}\right)$$

De esta manera, cuando el valor del índice resultante se aproxima a 50, este sugiere que corresponde a una cuenca simétrica, mientras que si el índice AF es mayor o menor de 50 implica la existencia de un basculamiento tectónico (Quijano 2014) .

Otro índice cuantitativo para evaluar la asimetría de una cuenca es el factor transversal de simetría topográfica (TTSF), siguiendo una técnica básica presentada por (Cox, 1994). Este índice es calculado usando la fórmula:

$$TTSF = Da/Dd$$

Donde **Da** es la distancia desde la línea media de la cuenca de drenaje a la línea de la corriente principal activa, y **Dd** es la distancia desde la línea media de la cuenca a la divisoria de aguas (figura 6). Valores de 0 indican una cuenca perfectamente simétrica, cuanto mayor sea la asimetría T tenderá a aproximarse a 1 (Oviedo Reyes, 2015).

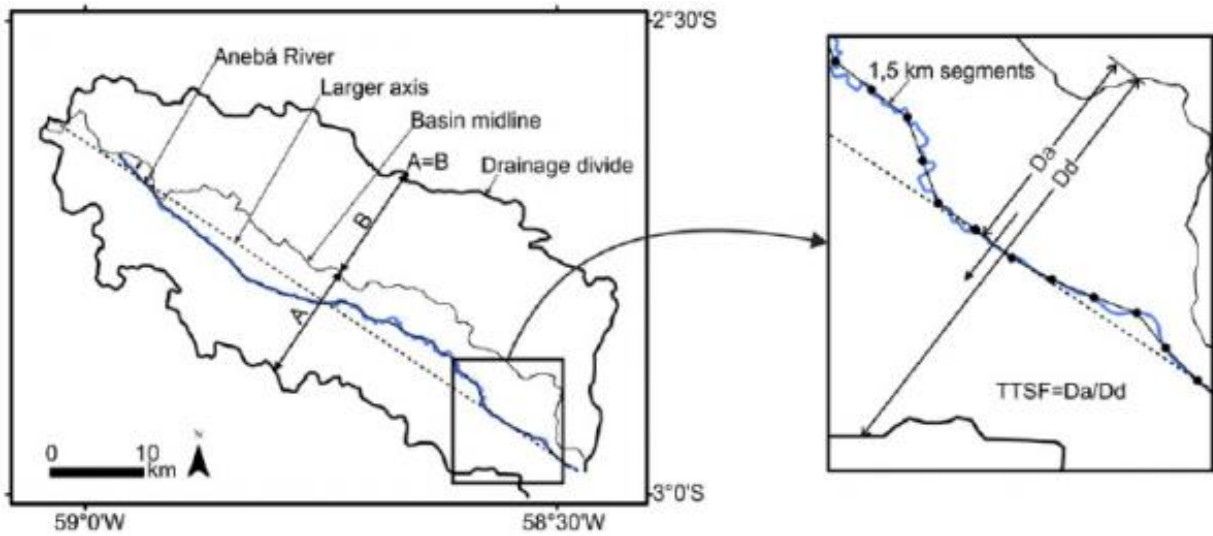


Figura 6. Ejemplo de cálculo del Factor transversal de simetría topográfica (TTSF) para el Río Aneba, Amazonas (Ibáñez, et al., 2014).

Teniendo en cuenta una zona de transición topográfica entre prominencias elevadas y un terreno plano, se realiza una traza planimétrica para evaluar la sinuosidad **del frente de Montaña (Smf)** (Figura 7) coincide o no con una zona de tectónica activa por acción de falla (Bull et al, 2007), Bull et al (2007) propone un índice para cuantificar dicho grado de actividad a través de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$Smf = \frac{Lmf}{Ls}$$

Donde **Smf** es la sinuosidad del frente de montaña; **Lmf** es la longitud planimétrica total a lo largo del frente de montaña y **Ls** es la línea recta del frente de montaña.

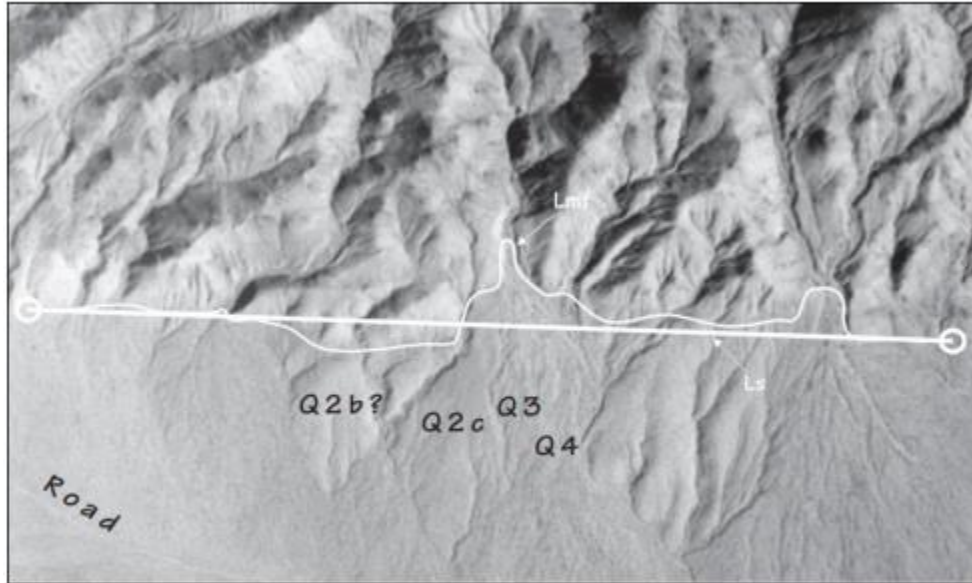


Figura 7. Frente de montaña tectónicamente activo asociado con una falla oblicua lateral derecha en el Desierto central Mojave de California. La línea blanca, gruesa y recta (Ls) representa la longitud del rango de acción de la falla. La línea delgada (Lmf) es la distancia a lo largo de la transición montaña-piedemonte (Bull, 2007).

## 5. Metodología para la obtención y procesamiento de datos fotogramétricos

El modelo conceptual utilizado para el desarrollo de este proyecto se dividió en tres etapas; (1) obtención de datos fotogramétricos; (2) procesamiento de datos y (3) análisis de resultados.

### 5.1. Obtención de datos fotogramétricos

Para la obtención de los datos iniciales se creó un base de datos con los soportes cartográficos generales del área de estudio y el uso del Drone como principal insumo de levantamiento fotogramétrico (Tabla 5).

Tabla 5. Cartografía disponible de la zona de estudio

<b>Cartografía general</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Escala</b>	<b>Año</b>
Topográfica	167 IID	1:25000	1979
Geológica	Plancha geológica 167 – Sonsón del Instituto Colombiano de Geología y Minas INGEOMINAS.	1:100000	2012
Geomorfológica	Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa Plancha 167 Sonsón	1:100000	2014
<b>Equipos utilizados</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Cámara</b>	
RPA's	Phantom 4 Pro-Plus	1" CMOS Píxeles efectivos: 20M	

Nota. Cartas cartográficas usada en el área de trabajo.

El uso de un RPA permitió tomar, a través del trazado de un trayecto previamente establecido (Figura 8), fotografías aéreas georreferenciadas y datos topográficos de la superficie del área de estudio a través de sensores incorporados en esta aeronave no tripulada.

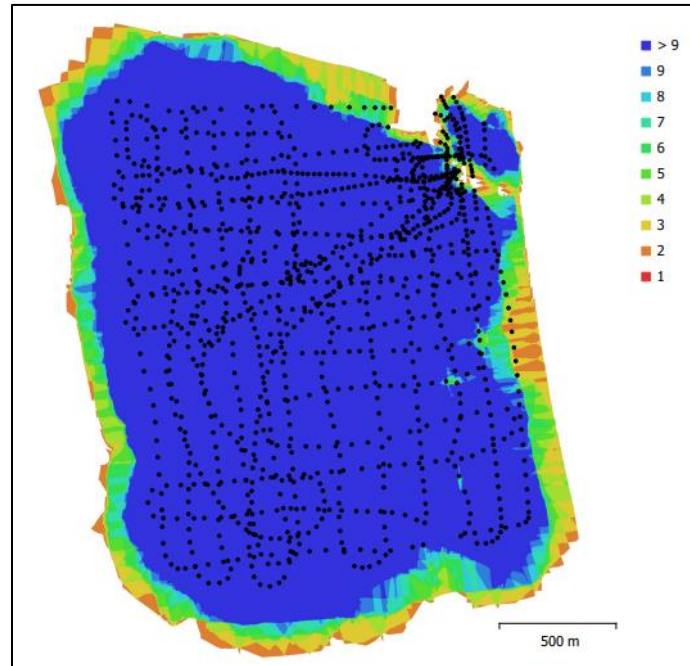


Figura 8. Gráfica donde cada punto representa la toma aérea de la fotografía (fuente propia)

Así mismo, se tuvo en cuenta el horario para la obtención de dichas tomas aéreas, ya que las sombras que generaba la posición del sol en el poniente permitieron resaltar características geomorfológicas del terreno.

## 5.2. Procesamiento de datos

Una vez obtenida la información aérea, se procede al procesamiento de datos topográficos e imágenes mediante el uso de varios software especializados propuestos por Gómez-Gutiérrez et al 2016, como lo es el uso de ArcGIS 10.8, ya que este permite realizar los análisis morfométricos correspondientes a través de la aplicación del cálculo de índices geomorfológicos sobre los datos obtenidos, y finalmente la plataforma Agisoft Metashape debido a que facilita la generación de la nube de puntos, la cual es la base para poder crear los productos digitales como el DEM y la superposición de imágenes, es decir un ortomosaico, para la creación de ortofotos de alta resolución (Figura 9).

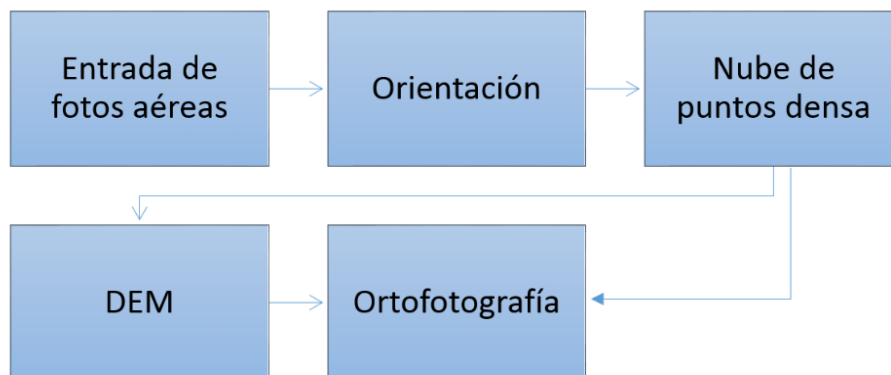


Figura 9. Modelo conceptual para la generación de todos los productos en Agisoft Metashape.

El procesamiento de los datos iniciales permite crear una nube de puntos densa, como la principal base para la generación de una capa DEM, el ortomosaico y los modelos 3D y 2D. Estos últimos, se obtienen con la finalidad de crear herramientas didácticas que les permita a los autores analizar desde distintas perspectivas las geoformas a una escala de mayor detalle.

## 6. Resultados

El sondeo del RPA en el plan de vuelo generó 1258 fotos con un margen de error de georreferenciación en los ejes X, Y y Z en promedio de 5m (Tabla 6 y 7).

Tabla 6. Datos relevantes del procesamiento

Datos del procesamiento	
Numero de imágenes	1258 fotos
Altitud media de vuelo	326m
Ángulo de la cámara para toma de fotos	90°
Área cubierta	470Ha

Puntos de paso	2,002,016
Nube de puntos densa	71,398,735

---

Nota. Datos entregados por el software de procesamiento

Tabla 7. Errores de posicionamiento de las cámaras

<b>Error en posiciones de cámaras</b>	
Error en X (m)	5.14031
Error en Y (m)	5.04993
Error en Z (m)	7.05055

---

Nota. Es el error de ubicación espacial de las imágenes en metros.

El sensor del RPA a medida que este realizaba su recorrido aéreo, diagnosticó una topografía con rangos altitudinales entre la cota 650 a nivel del río Arma hasta la cota 1040m. Cuya diferencia de 400m se logró inferir por el cambio litológico del lugar; bajas y suavizadas topografías se correlacionaron con unidades sedimentarias de la formación Amagá, depósitos cuaternarios y las prominencias topográficas de mayor altura, con rocas cristalinas metamórficas e intrusivas (Figura 10).

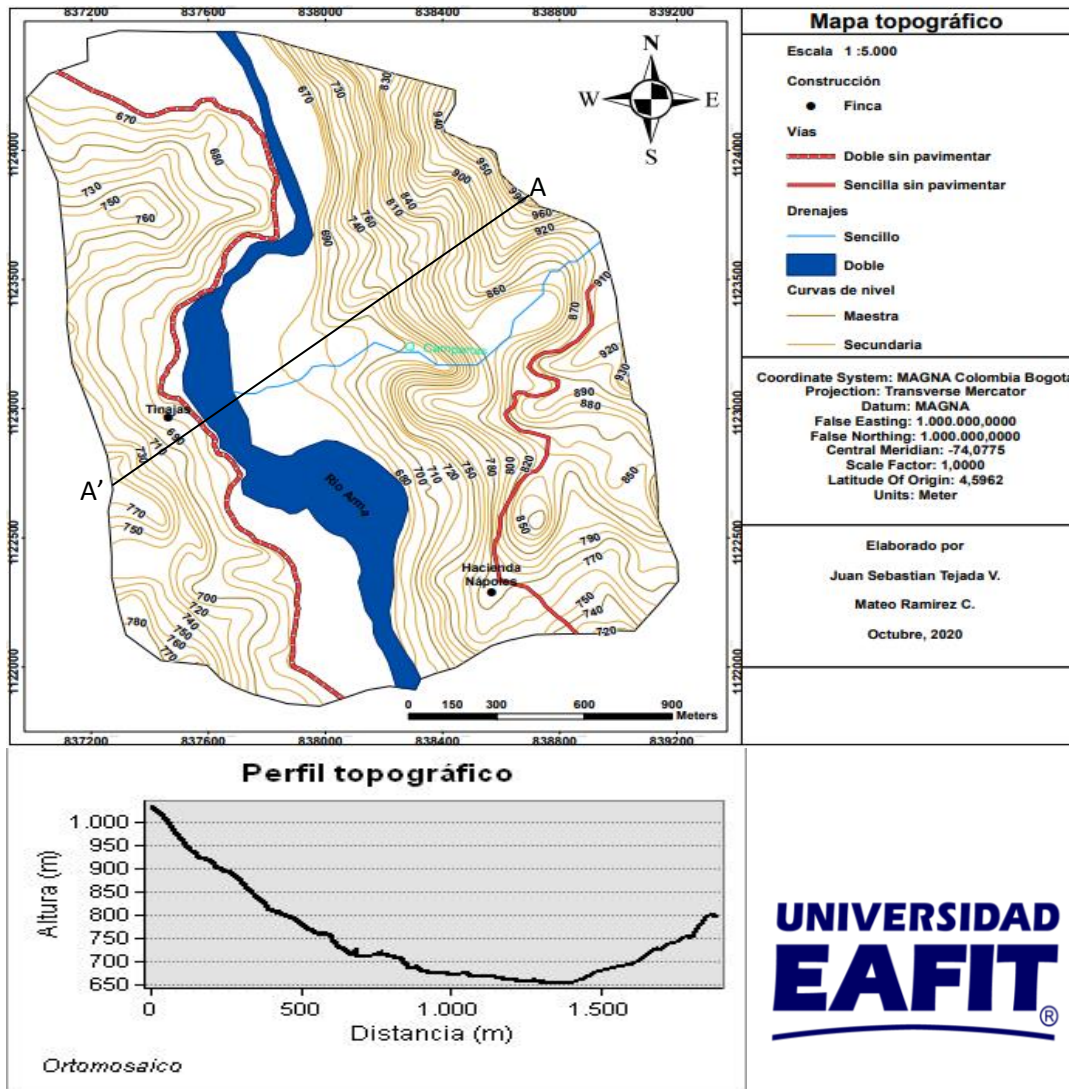


Figura 10. Mapa y perfil topográfico del valle del rio Arma a escala 1:5000. Fuente propia.

En este sentido, con la obtención de las fotos aéreas, se procedió a la unión de estas por medio de Agisoft Metashape, el cual orientó las imágenes con la función orientar imágenes de la opción flujo de trabajo en Agisoft. Esto se desarrolla directamente debido a que no se requiere de parámetros de calibración. Por lo tanto, una vez ubicada espacialmente y de manera continua cada fotografía se podrá observar la nube de puntos dispersa, la cual consiste en una cantidad de puntos que han sido traslapados unos sobre otros formando imágenes con mayor resolución.

Posteriormente fue posible realizar la nube de puntos densa con la función “crear nube de puntos densa” clasificando los puntos según su naturaleza; objetos, terreno y ruido (Figura 11 y 12).

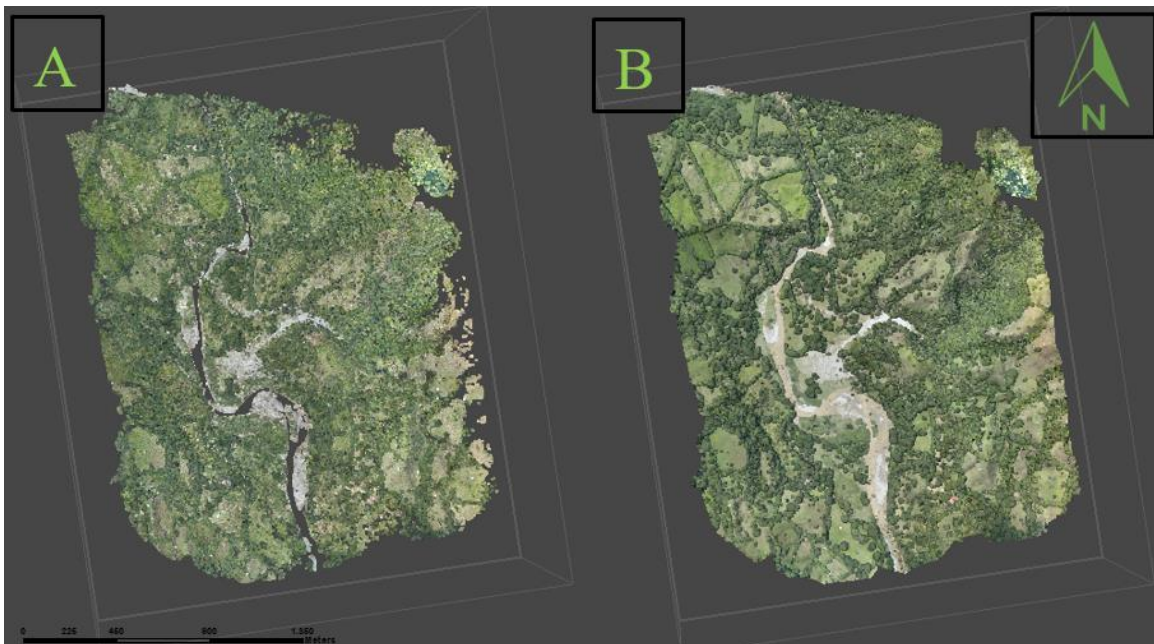


Figura 11. A) Nube de puntos dispersa. B) Nube de puntos densa.

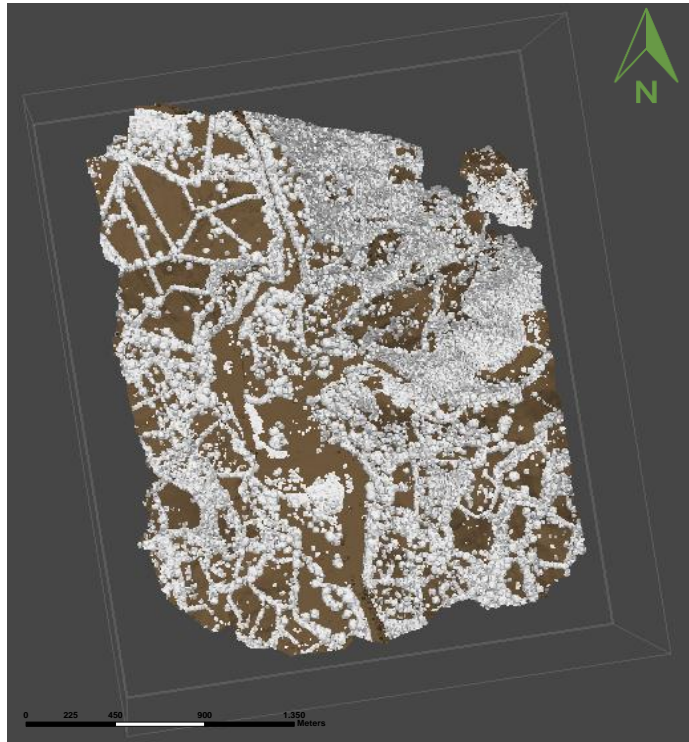


Figura 12. Nube de puntos densa clasificada en dos categorías: la primera abarca árboles, casas y puntos altos (color blanco) y la segunda el terreno y puntos bajos representados por el color café.

Para este paso se utilizó la función de herramientas “nubes de puntos densa” y seguido “clasificar puntos del terreno”. Automáticamente la interfaz clasificó el terreno en puntos bajos como la vegetación alta, construcciones y vías. Finalmente se generó un DEM del área de estudio delimitada de altísima resolución (Jimenez-Jimenez et al 2017) (Figura 13 - A).

Una vez clasificado los puntos de terreno y creado el modelo de elevación digital (DEM) se logró obtener la ortofotografía con una resolución de detalle de 33cm/píxel (71 millones de puntos) (Figura 13 - B)

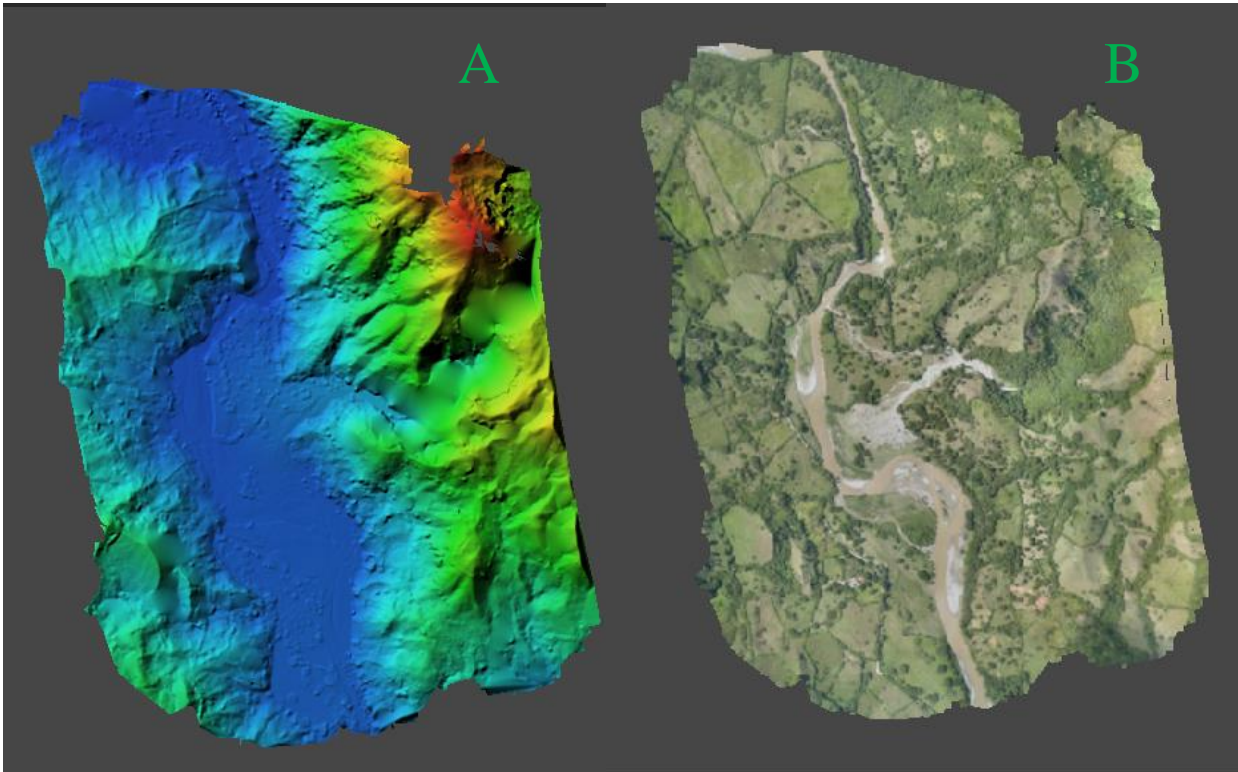


Figura 13. A) Modelo de elevación digital (DEM) generado en el software Agisoft Metashape. B) Ortofotografía generada en el software Agisoft Metashape.

Es así como, todos los productos anteriores obtenidos del procesamiento fueron utilizados para el desarrollo de un mapa geomorfológico a escala 1:5000.

### **6.1. Mapa geomorfológico**

Para el motivo de este trabajo, se hizo uso del sistema de clasificación de unidades geomorfológicas definidas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017), ya que estos describen con mayor detalle cada rasgo evidenciado en el paisaje; así mismo, la escala para la elaboración del mapa geomorfológico se estableció en 1:5000 (Figura 14) como apoyo de análisis se utilizó el mapa producto topográfico y el DEM generado por el procesamiento de datos obtenido por el RPA.



NS asociado al control estructural de la zona (Escobar y Mesa, 2020), dejando a su paso geoformas como las terrazas, las barras, las barras puntuales y la presencia de llanuras de inundación actuales.

Este último ambiente y como producto también de la tectónica activa de los Andes, se evidencia la presencia de una unidad relativamente reciente cuyas características morfológicas describen un abanico aluvial de pequeñas dimensiones generado por el paso de la quebrada Campanas en la desembocadura del río Arma. Geoforma objeto de estudio de este trabajo.

Hacia el margen oriental del mapa se identificaron, al igual que en el texto anterior, unidades geomorfológicas de origen denudacional y estructural; para el primer grupo las unidades identificadas consisten en lomas denudadas y colinas remanentes, estas se han formado sobre las rocas ígneas y metamórficas del complejo Quebrada Grande.

Por otro lado, la presencia de una colina remanente a los procesos intensos de la denudación presenta una base corta y se constituye como una unidad con laderas abruptas a escarpadas ubicándose hacia el margen centro-oriental del mapa.

Como unidades resultantes a la intervención antrópica, se identificaron superficies de explanación, ubicada hacia el margen occidental de esta zona delimitada.

## **6.2. Marcadores geomorfológicos**

En el paisaje se distinguen características que permiten una calibración directa de la tasa de deformación como las terrazas, dicha calibración corresponde principalmente al desplazamiento de los marcadores geomorfológicos cuyas geometrías son bien conocidas (Burbank y Anderson, 2001), las formas iniciales de elementos que van desde los canales de las corrientes hasta las laderas no son muy bien conocidos, esto debido a que estas geometrías están en constante respuesta a la deformación, variación del nivel base y cambio climático dando como resultado calibraciones indirectas de las tasas de deformación (Burbank y Anderson 2001).

El reconocimiento de fallas puede ser analizadas en las rupturas de marcadores geomorfológicos, pero no siempre se pueden observar debido que las evidencias en superficie pueden estar siendo cubiertas por diferentes factores como la presencia de una densa vegetación, en dichos casos se deben realizar análisis cuantitativos del paisaje (Burbank y Anderson 2001)

Dichos cambios se dan en la inclinación de la pendiente de los índices de los canales, ángulos de pendientes, y el relieve topográfico, estos se realizan con el fin de delinear un gradiente espacial para interpretar la respuesta a una falla cubierta.

Para definir las áreas locales se utilizaron los mapas regionales y los perfiles topográficos, dando como resultado la delimitación del abanico aluvial hacia la zona central del área de estudio, por lo tanto

La morfología del abanico se realizó siguiendo los criterios utilizados en el trabajo de Colombo (2010), donde se diferenciaron tres áreas, la primera definida por ser la más alta topográficamente como área alta (AA), la segunda por presentar un cambio de pendiente definiéndose como el punto de intersección (AM) y el pie de abanico el cual es la zona topográficamente más baja (AB), también hacia la parte sur se identificó un lóbulo de abanico (ZD), finalmente se reconoció la incisión del abanico donde recorre la quebrada Campanas (ZR) (Figura 15)

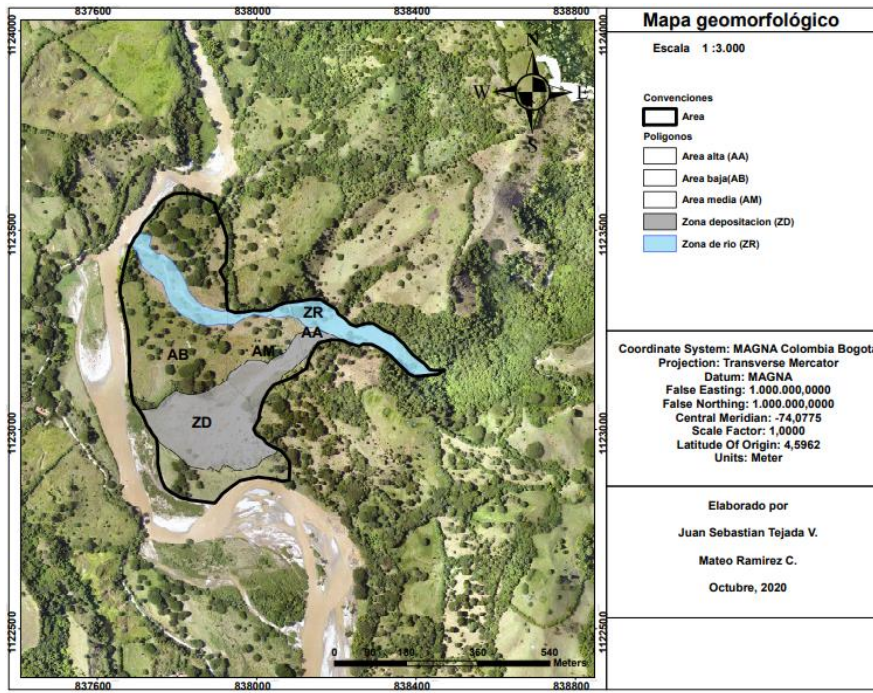


Figura 15. Cartografía del abanico aluvial. Fuente propia.

Una vez identificado el marcador geomorfológico se procede a trazar transectos perpendiculares al cauce principal, una vez obtenidos los perfiles transversales (A-L) será posible la identificación de zonas activas o inactivas (Ayaz, Biswas y Dhali, 2017) (Figura 16).

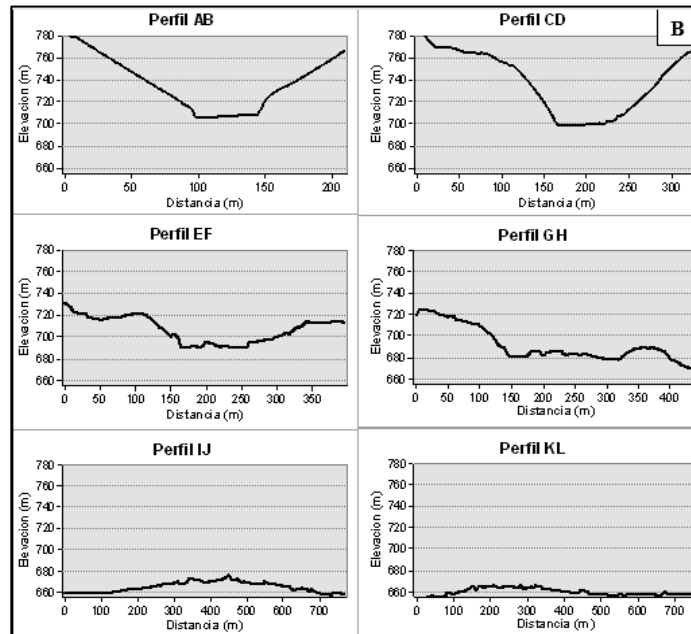
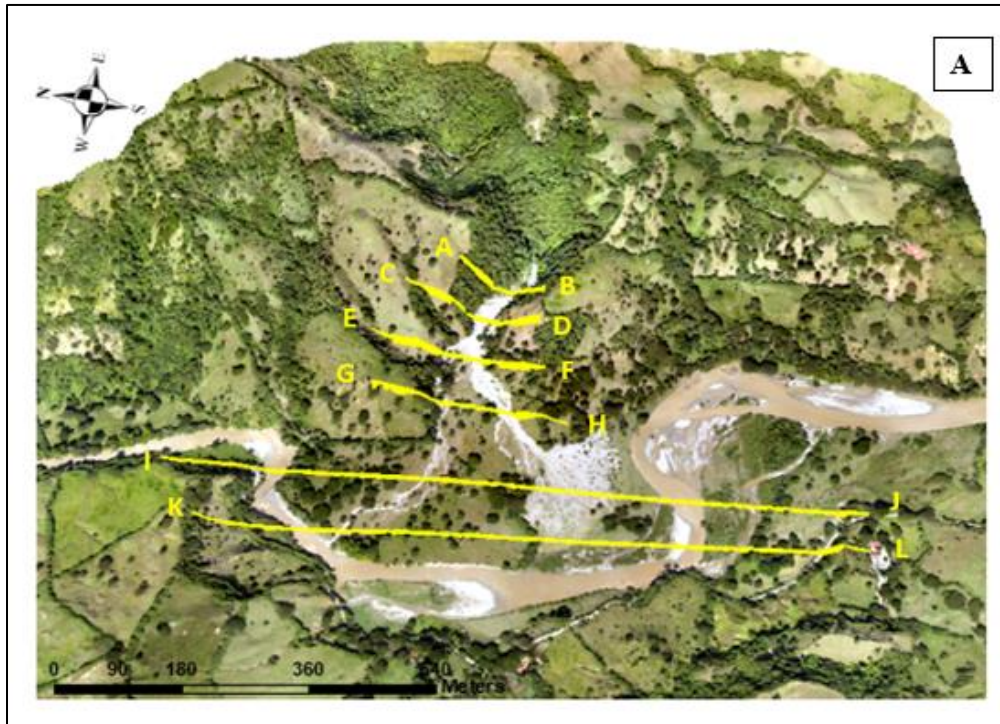


Figura 16. A) Ortomosaico del abanico aluvial. B) A-L diferentes líneas de segmentos que indican topografía irregular en la superficie del abanico. Fuente propia.

Por otro lado, se realizaron cuatro perfiles longitudinales del abanico y se superpusieron con los perfiles transversales (Figura 17) para cada perfil longitudinal se calcularon los ángulos existentes entre los transectos (Figura 18), dichos ángulos sirven como herramienta para hallar deformación localizada en la topografía y geometría del marcador geomorfológico (Burbank y Anderson, 2001).

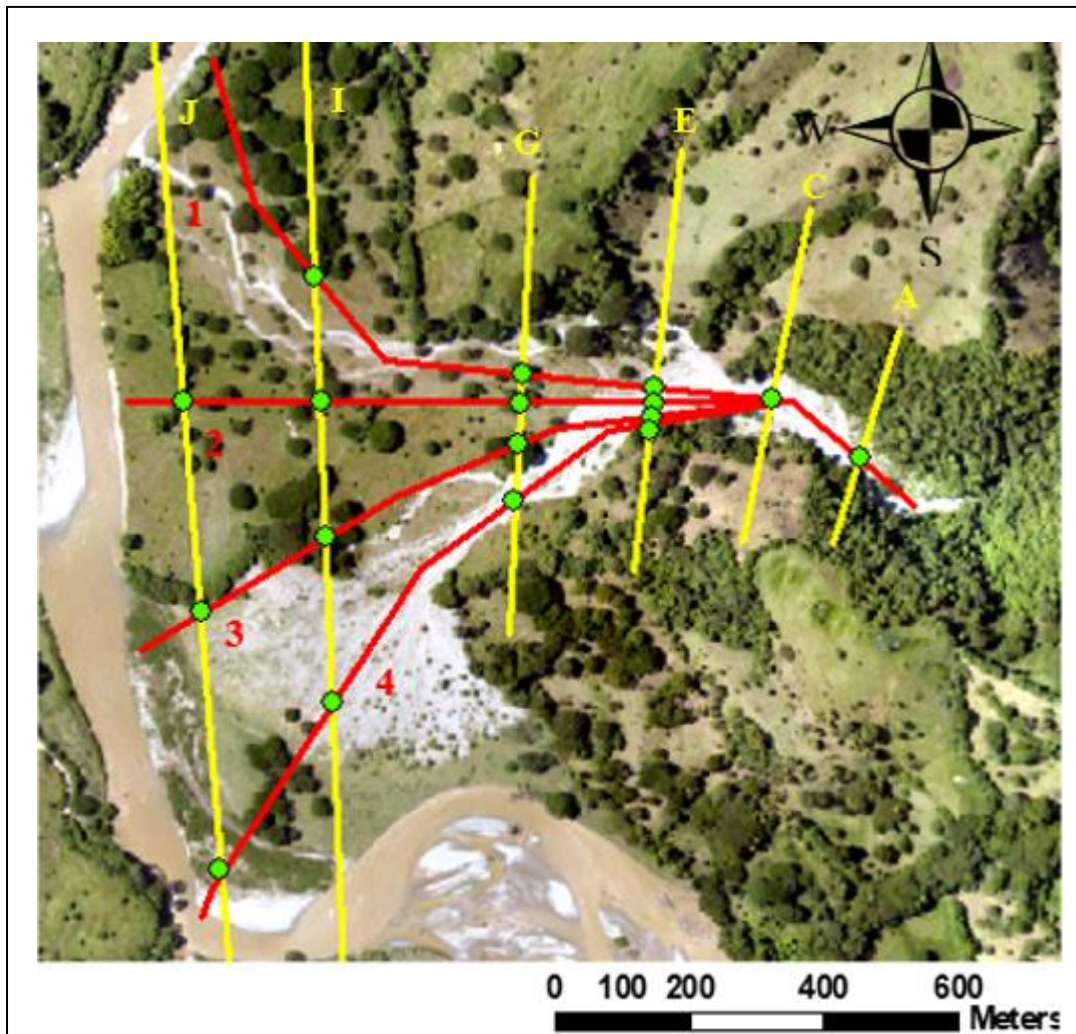


Figura 17. Traslapo de líneas longitudinales 1-4 (rojo) y transversales A-K (amarillo) representado por los puntos de color verde.

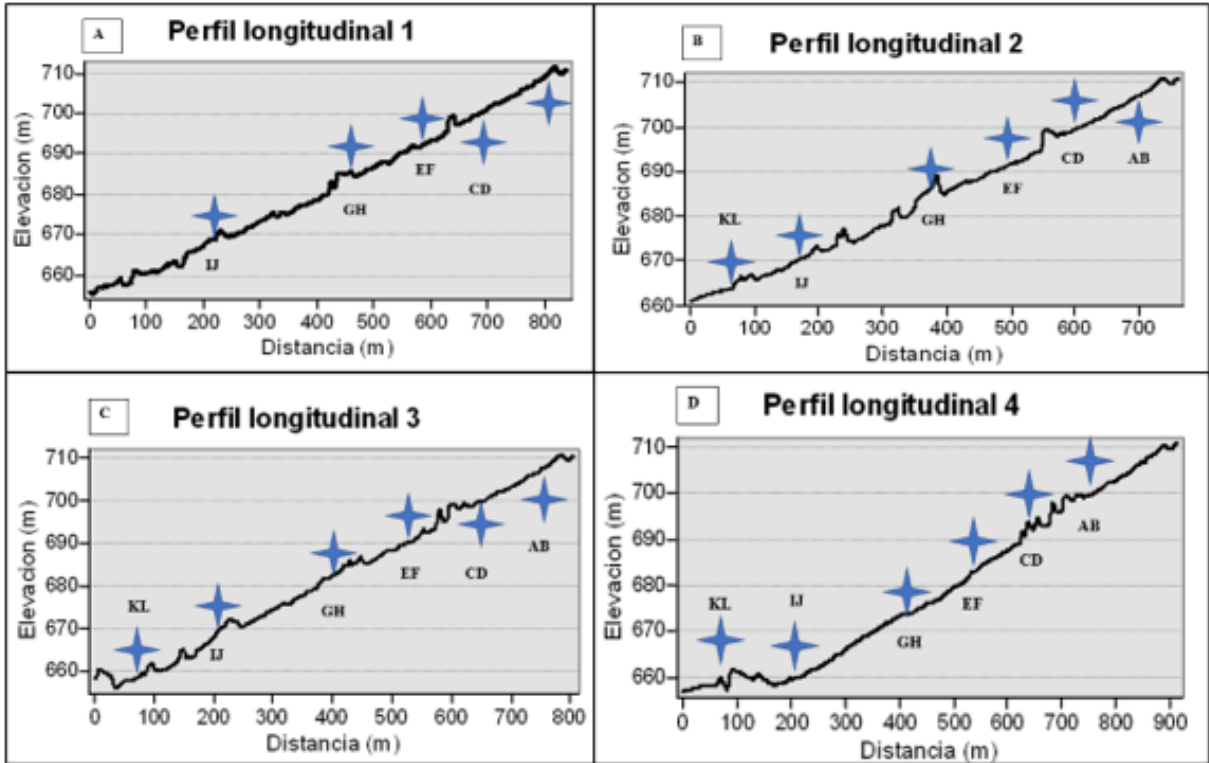


Figura 18. A-B) Para cada perfil longitudinal se ubicó el contacto con los transectos, los puntos rojos son las ubicaciones de los cálculos de los ángulos de interés.

La tabla donde se indican los ángulos para cada perfil se muestra a continuación:

Tabla 8. Ángulos entre los transectos para cada perfil longitudinal.

<b>Angulo entre transectos perfil 1</b>	<b>Angulo (°)</b>
AB- CD	4.11
CD-EF	3.71
EF-GH	3.66
GH-IJ	3.77
<b>Angulo entre transectos perfil 2</b>	
AB- CD	4.31

CD-EF	4.11
EF-GH	2.86
GH-IJ	4.23
IJ-KL	3.77
<b>Angulo entre transectos perfil 3</b>	
AB- CD	4.11
CD-EF	4.6
EF-GH	4.5
GH-IJ	4
IJ-KL	4.2
<b>Angulo entre transectos perfil 4</b>	
AB- CD	4.2
CD-EF	3.9
EF-GH	2.3
GH-IJ	3
IJ-KL	2.4

Nota. Angulo obtenido para cada interfecto de los perfiles longitudinales del abanico aluvial.

### 6.3. Índices morfométricos

Para el cálculo de los valores morfométricos se utilizó la herramienta “calcule geometry” en ArcGIS, dando como resultados para la cuenca hidrográfica los valores de área, perímetro, longitud y ancho, posteriormente con dichos valores se calcularon los índices de Gravelius, factor forma y Radio de elongación, sucesivamente para el abanico se calculó el área, perímetro, longitud y ancho, los valores obtenidos se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 9. Índices morfométricos.

<b>Índices morfométricos del abanico</b>	<b>Valor (km)</b>
Área	0.24
Perímetro	2.97
Longitud	0.858
Ancho	0.29
<b>Índices morfométricos de la cuenca</b>	<b>Valor(km)</b>
Área	6.39
Perímetro	13.6
Longitud	4.3
Ancho	1.5
Longitud del cauce principal	5.6
Longitud máxima de la cuenca	5.9
Índice de Gravelius	1.5
Relación de elongación	0.25
Factor forma	0.34

Nota. Índices morfométricos del abanico aluvial y de la cuenca.

La relación de los índices entre la cuenca y el abanico que indican se muestran a continuación:

Tabla 10. Relación abanico cuenca

<b>Relación abanico – cuenca (A/C)</b>	<b>Valor</b>
Área	3.75%
Perímetro	21%
Ancho	19%

Nota. Relación entre en abanico aluvial y la cuenca hidrográfica.

### 6.3.1 Sinuosidad del frente de montaña

La sinuosidad del frente de montaña es un indicador importante para evaluar si coincide o no con una zona de tectónica activa por acción de una falla (tgt). Para calcular la sinuosidad del frente de montaña se realizó un “feature class” para crear una línea paralela al rio Arma, posteriormente se relacionó la longitud de la línea creada con la longitud del rio arma (ver formula donde se muestra la fórmula de este indicador), el valor obtenido es la cuantificación de las modificaciones erosiónales que sufren los frentes de montaña (Figura 19).

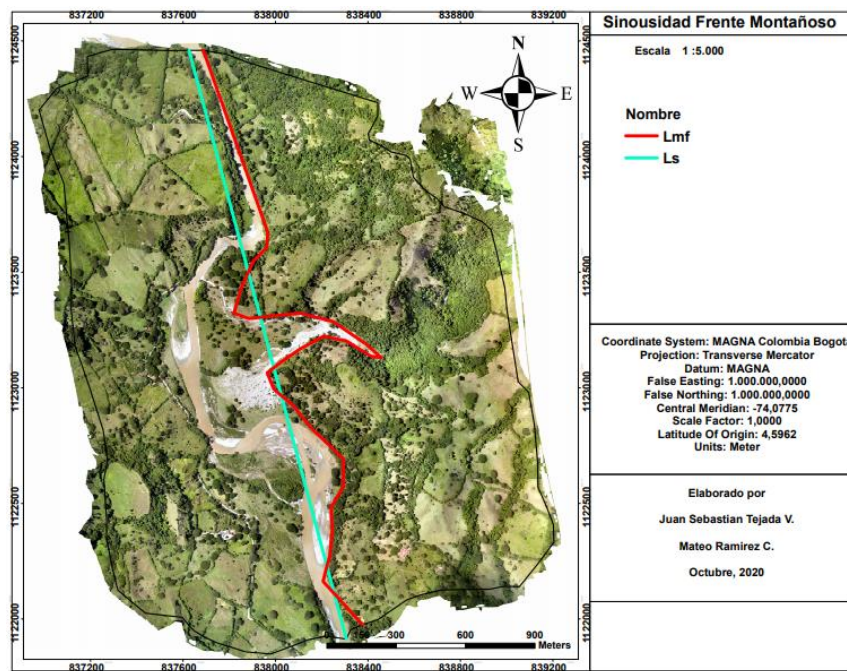


Figura 19. Mapa representativo de las líneas Ls y Lmf, fuente propia.

Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla

Tabla 11. Valores y resultado del cálculo de la Sinuosidad del frente de montaña.

Longitud del Frente de montaña (Lmf) (km)	Línea recta asociada (Ls) (km)	Resultado (km)
6.605	2.635	2.5

Nota. Valores obtenidos del cálculo de la sinuosidad del frente de montaña

La clasificación utilizada para determinar el grado de actividad tectónica fue la definida por Bull W (2009) (Figura 20)

<b>Smf &gt; 3</b>	<b>Frente de montaña inactivo</b>
<b>1.5-3</b>	<b>Frente de montaña moderadamente activo</b>
<b>1.0 - 1.5</b>	<b>Frente de montaña altamente activo</b>

Figura 20. Clasificación de la actividad tectónica, tomado de Molano y Torres (2018).

#### **6.4 Índices geomorfológicos**

El cálculo de índices geomorfológicos que permitan caracterizar la actividad de tectónica reciente consistieron en la curva hipsométrica, asimetría de la cuenca de drenaje y el factor de topográfica transversal, estos valores fueron calculados en la cuenca hidrográfica de la quebrada Campanas utilizando la herramienta “calcule geometry” y “zonal stadistic” en ArcGIS (Figura 21).

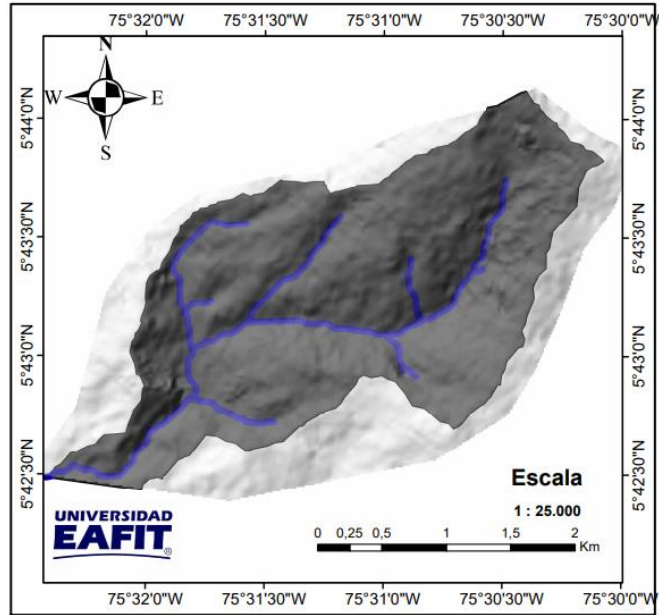


Figura 21. Cuenca hidrográfica de la quebrada Campanas, fuente propia.

#### 6.4.1 Curva e integral hipsométrica (IH)

La curva hipsométrica es un indicador el cual describe como están distribuidas las áreas de terreno entre dos curvas de nivel consecutivas, para calcular el área de la cuenca de la quebrada Campanas se relacionó la elevación y el área relativas entre cotas, posteriormente los datos de elevación y área se obtienen utilizando “Zonal stadistic”, dichos datos se exportan a Excel y se representan en un grafio de dispersión x/y generando la curva hipsométrica (Figura 22).

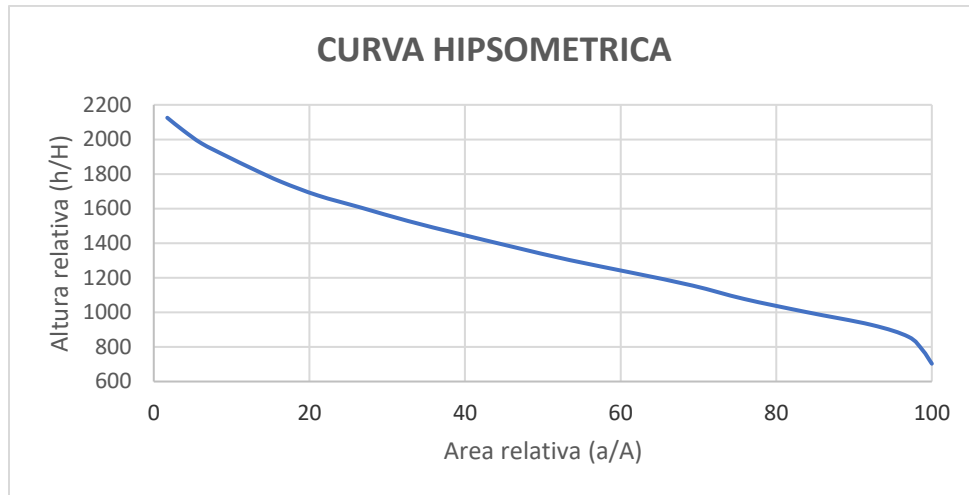


Figura 22. Curva integral e hipsométrica de la cuenca hidrográfica de la quebrada Campanas.

Con base a la integración del área bajo la curva se obtiene el valor que indica el estado de la cuenca hidrográfica, dicho valor se podrá comparar con los valores dados por Fleite y De Lorio, (2017) que son: valores superiores al 60 % indican desequilibrio (juventud) valores entre el 60% y 35% representan equilibrio (madurez), e inferiores al 35% implican fase de “monadnock” (seniles).

#### 6.4.2. Índice de Asimetría de la cuenca de Drenaje (AF)

Los índices de asimetría son importantes porque indican a nivel general la existencia de un posible basculamiento, esto se determina calculando las áreas de los márgenes laterales del cauce principal de la cuenca hidrográfica (Figura 23), una vez obtenido el valor del área de estos márgenes se utilizan las fórmulas utilizadas en el trabajo de Keller y Pinter (2002) (Figura 5) dando como resultado los valores de AFi y AFd (Tabla 12)

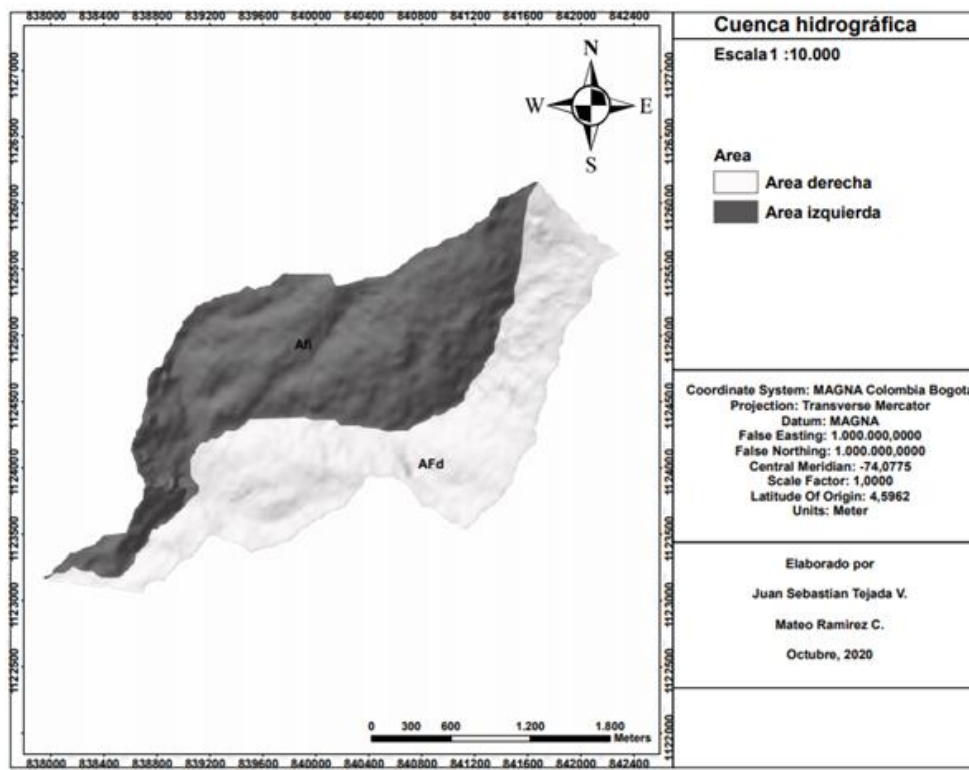


Figura 23. Márgenes laterales del cauce principal, siendo AFi el margen izquierdo y AFd el margen derecho, fuente propia.

Los valores obtenidos se observan en la siguiente tabla:

Tabla 12. Valores de AFd y AFi

Cuenca hidrográfica	Área en m <sup>2</sup>
Área total	6265679
Área margen derecha	2856743
Área margen izquierda	3408912
AFd	45.60%
AFi	54.40%

Nota. Valores del índice de asimetría de la cuenca.

Finalmente, los valores indicaran si existe o no influencia de actividad tectónica, donde el valor de Afi si se aproxima a 50% significa una influencia menor de actividad tectónica, y cuando se aleja del 50% significa una alta influencia de actividad tectónica (Quijano, 2014).

### 6.4.3. Factor transversal de simetría topográfica

Este índice al ser más sensible a un posible basculamiento hará posible una cuantificación de manera más precisa acerca de la existencia o no de actividad tectónica (Quijano 2014), estos valores se obtuvieron calculando la distancia entre el límite de la cuenca y la línea divisoria dentro de la propia cuenca de drenaje (DD) y la distancia existente entre la divisoria interna de la cuenca desde el drenaje hasta el cauce principal que la disecta (DA), al realizar varios segmentos de DD y Da es posible calcular el Factor T, finalmente varios factores T se calcularon y luego se promediaron para obtener un resultado más exacto (Figura 24).

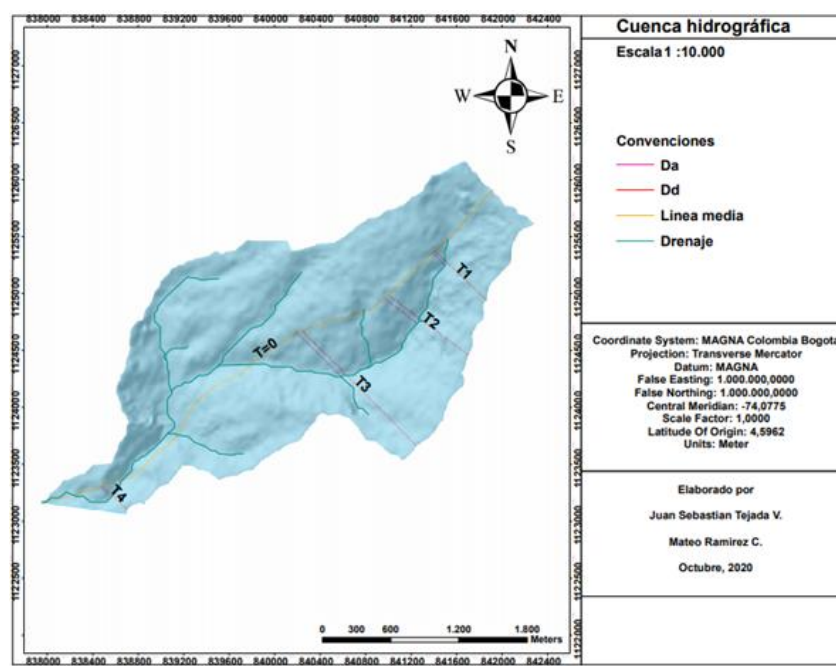


Figura 24. Se realizaron 4 cálculos del factor T a lo largo de la línea divisoria dentro de la cuenca, fuente propia.

Los valores obtenidos se promediaron para así obtener el factor T más preciso, a continuación, se muestran los resultados:

Tabla 13. Resultado del promedio del factor T.

<b>T</b>	<b>DD (m2)</b>	<b>DA (m2)</b>	<b>Factor T</b>
<b>T1</b>	6,228,271	1,555,814	0.24
<b>T2</b>	883,643	3,624,605	0.41
<b>T3</b>	1,430,308	5,477,942	0.38
<b>T4</b>	3,034,738	1,271,877	0.41
<b>Tpromedio</b>			0.36

Nota. Resultados promedios del factor transversal de simetría topográfica.

## **7. Análisis de los resultados**

### **7.1. Cuenca hidrográfica de la Quebrada Campanas**

De acuerdo con la clasificación presentada por el IDEAM (2002) para las unidades hidrográficas teniendo en cuenta la variable área, esta cuenca se encuentra dentro del rango de clasificación de como cuenca muy pequeña (3-25 km<sup>2</sup>), esta clasificación se ve soportada por las variables de perímetro longitud y anchura, teniendo en cuenta dichas variables se puede inferir que la producción de sedimentos y la depositación de estos en el abanico aluvial también son de magnitudes pequeñas. La relación del área de la cuenca contra el área del abanico fue de 3.75% esto indica que existe una baja diferencia entre la proporcionalidad del área de la cuenca con el área del abanico aluvial, señalando que, al ser una microcuenca, el desarrollo del abanico es de igual proporción. Este valor nos muestra la baja diferencia que existe entre la proporción del área de la cuenca y el abanico aluvial, lo que indica que factores como los índices de forma (índice de Gravelius, elongación, Horton y relación de circularidad), pendiente del cauce principal y la tectónica pueden estar influenciando para que esto no se cumpla.

La relación de elongación del 0.34% se clasifica en un grado de elongación menor, lo cual significa que entre más redonda es el retardo de momento de precipitación y momento de

crecida a la desembocadura será mayor, aunque la crecida será más súbita y generará un incremento de riesgo de inundación.

La cuenca al ser ligeramente achatada estará sujeta a menores crecidas, pero por este achatamiento también habrá mayor concentración de escurrimientos en eventos de lluvias intensas las cuales formaran crecidas más fácilmente.

El valor de la pendiente es bajo (7%) y se clasifica como una cuenca de baja pendiente. Esta pendiente se atribuye a actividad tectónica, esto último está soportado en los índices geomorfológicos los cuales evidencian basculamiento en el margen izquierdo del cauce principal de la cuenca, además al estar tectónicamente controlado por una falla de cabalgamiento como la falla Arma, las unidades se están cabalgando sobre el abanico produciendo una variación topográfica mayor, en consecuencia mayor acumulación de sedimentos. Otros valores como el índice de elongación, índice de Gravelius, Horton y relación de circularidad la clasifican como una cuenca redonda a oval redonda a oval alargada, lo que muestra como la cuenca tiene una media/alta capacidad de erosión y por ende una capacidad de producción y depositación de sedimentos hacia zonas más bajas como lo es el abanico aluvial. Lo anterior indica que a pesar de que la cuenca tenga una pendiente baja, su forma redondeada alargada ayuda a que el abanico aluvial reciba un aporte significativo de sedimentos por parte de la cuenca. Esta forma genera que los sedimentos sean transportados en un mayor tiempo hacia zonas bajas, pero sin tener la máxima concentración de materiales que genera una cuenca con formas más alargadas.

## **7.2. Marcadores geomorfológicos**

Los perfiles transversales realizados en el abanico aluvial evidencian una incisión preferencial de la quebrada Campanas en dirección EW formando el canal en la parte más norte del abanico, esto debido a que la incisión de la quebrada se concentra en la parte occidental de los perfiles transversales de CD-KL, a diferencia del AB el cual tiene una forma convexa, desde el perfil EF hasta el perfil KL se observa que las zonas orientales presentan una formación leve de una geometría convexa y en menor grado ondulaciones, indicando una

depositación para estas áreas, mientras que en los mismos transectos hacia las zonas occidentales el canal sigue siendo evidenciado por las ondulaciones y la forma cóncava, también se observa que en el transecto CD la forma es de geometría convexa con una leve variación con respecto al transecto AB, donde esta variación de cóncavo a convexo se vuelve aún más notable hacia la zona EF, donde la presencia de ondulaciones en la parte oriental del perfil y en general una parte cóncava marcan este cambio, estas ondulaciones indican que el abanico está siendo incisado en esta área, luego en el transecto GH la incisión sigue siendo notable hacia el margen occidental mientras que el margen oriental está tomando forma convexa, para los perfiles IJ y KL la incisión sigue constante en la zona occidental, pero para las otras zonas ya se está evidenciando ondulaciones y concavidad.

Respecto a los perfiles longitudinales existe una variación en el relieve topográfico dado por la diferencia de ángulos entre los transectos superpuestas en dichos perfiles, esto se evidencia en los perfiles 1-4 que presentan ángulos entre EF-GH de  $3.66^\circ$ ,  $2.86^\circ$ ,  $4.5^\circ$  y  $2.3^\circ$  respectivamente, también para los perfiles 2-4 entre IJ-KL los ángulos son de  $3.77^\circ$ ,  $4.2^\circ$  y  $2.4^\circ$  respectivamente, cabe resaltar que el perfil 1 no se superpone con el transecto KL.

## **8. Discusión**

la proporción dimensional del abanico con respecto al área de la cuenca corresponde al 3.75%, valor el cual indica que esta geofoma además de ser de reducidas proporciones la depositación de materiales sedimentarios, también son considerablemente bajos.

La relación de elongación de la cuenca es de 0.34%, dando a entender que la cuenca es ligeramente achatada y estará sujeta a menores crecidas, pero por este mismo achatamiento, la cuenca estará más propensa a tener una mayor concentración de escurrimientos en lluvias intensas, como consecuencia se formarán fácilmente crecidas.

En relación con la baja pendiente que tenemos en la cuenca (7%), se atribuye a la actividad tectónica en la zona. Esto se soporta por los resultados de los índices geomorfológicos, los que evidencian un basculamiento en el margen izquierdo del cauce principal de la cuenca, y así mismo tener en cuenta que la zona está controlada tectónicamente por una falla de

cabalgamiento que es la falla Arma, lo que produce una variación topográfica y una mayor generación de sedimentos.

Con base a los índices de Gravelius, Horton y la relación de circularidad se clasifica la cuenca como oval redonda a oval alargada, lo que nos demuestra que la capacidad de erosión de la cuenca es media y así mismo sería la capacidad de producción y depositación de sedimentos en el abanico aluvial. A pesar de que la cuenca tenga una pendiente baja no quiere decir que la depositación de sedimentos en el abanico sean muy bajas, ya que su forma medianamente alargada ayuda a que el abanico aluvial reciba un aporte significativo de sedimentos por parte de la cuenca.

Para analizar las deformaciones en el abanico aluvial se utilizaron perfiles transversales donde estos a lo largo de su trayecto mostraron asimetría en el relieve de norte a sur, los perfiles longitudinales los cuales mostraban pendientes constantes como en los perfiles 1 y 2 desde la parte más alta hasta la desembocadura en el norte del abanico, también pendientes que se iban suavizando como en el perfil 3 debido a que predomina la depositación, además entre los puntos donde formaban transectos entre ambos perfiles se evidenció que había variaciones de ángulos entre cada transecto para cada altura, estos tres últimos indicadores sugieren que el abanico ha cambiado su geometría inicial, también estos indicadores permiten relacionar las zonas activas e inactivas del abanico con base a las gráficas de los perfiles transversales, indicando la parte activa del abanico hacia el norte, donde la quebrada Campanas incisa en su recorrido el lecho terrestre del abanico hasta llegar al río Arma, dichos análisis se pudieron interpretar con base a los perfiles transversales CD-EF.GH-IJ-KL los cuales representan en sus gráficas ondulaciones y formas convexas. Así mismo las zonas inactivas se relacionaron con la parte sur del abanico, esta relación se logra con base a los perfiles transversales EF-GH-IJ-KL donde se observa que no hay actividad de incisión, tampoco ondulaciones y formas convexas si no todo lo contrario, formas cóncavas y planas, donde evidencian predominancia de la depositación.

Con base en lo anterior estos indicadores sugieren que el cambio de forma original del abanico aluvial, a la que en la actualidad presenta está posiblemente relacionado con levantamientos tectónicos, fallas, u otros factores que afectan el relieve de la zona,

## 9. Conclusiones

A partir del análisis morfométrico realizado sobre el abanico aluvial de la microcuenca de la quebrada la Campana se deduce que debido a los valores obtenidos, la forma \_\_\_ de la cuenca, las deformaciones del abanico y el grado de inclinación \_\_\_ de las pendientes, es posible inferir que la génesis de esta geoforma obedece a la influencia tectónica de la región y a su vez, directamente alimentado por el cauce de la quebrada Campanas de comportamiento con comportamiento torrencial que lo alimenta..

A pesar de que el abanico evidencia pequeñas dimensiones, este se convierte en un enclave para entender la tectónica actual del lugar y la evolución del paisaje en el cuaternario. Además, el fácil uso del RPAS, su versatilidad y su fácil acceso a cualquier condición geográfica, permitió obtener información de manera precisa y detallada logrando optimizar el tiempo y la reducción de costos en las campañas de campo.

El uso del RPA también permite crear rápidos levantamientos donde se puedan realizar inventarios los cuales detallen indicadores geomorfológicos de mayor relevancia del paisaje, para posteriormente ser incorporados en la gestión del riesgo dentro de los Planes de Ordenamiento Territorial.

A partir de los análisis realizados al abanico aluvial, se logro identificar que la geometría de este ha sido deformada por actividad tectónica reciente, ya que la zona que más afectación presenta es la parte norte al mostrar ondulaciones en los perfiles transversales CD-EF.GH-IJ-KL atribuido a la actividad de incisión de la quebrada Campanas, por otro lado, la zona más inactiva está representada en los perfiles transversales EF-GH-IJ-KL debido a la poca actividad de incisión fluvial.

## 10. Recomendaciones

- Relacionar datos estructurales de autores que han estudiado la zona con el fin de obtener dirección de los esfuerzos, lugares con mayor tasa de levantamiento y finalmente mejor interpretación del control estructural de la zona.
- Realizar dataciones geocronológicas del abanico para obtener datos precisos de temporalidad.
- Analizar abanicos que estén en la zona del valle del río Arma con el fin de correlacionar los datos a un nivel más regional.
- Analizar estratigráficamente el abanico para conocer la evolución a lo largo del tiempo.
- Generar productos digitales como la ortofoto, modelado 3D y el DEM por medio de RPAS de la subcuenca de la quebrada campanas, con el fin de obtener análisis con mayor precisión de los índices geomorfológicos, esto debido a que los autores se vieron obstaculizados por la crisis de salud mundial producida por el covid-19.

## 11. Bibliografía

Alarcon, Eduardo y Audemard, Franck y Singer, André. (2014). Mapa neotectónico de la depresión de Santa Inés, en el estado Lara, Venezuela.. 10.13140/2.1.3727.0080.

Anita Simic Milas, Joaquim João Sousa, Timothy A. Warner, Ana Cláudia Teodoro, Emanuel Peres, José Alberto Gonçalves, Jorge Delgado Garcia, Ricardo Bento, Stuart Phinn y Amy Woodget (2018) Unmanned Aerial Systems (UAS) for environmental applications special issue preface,

Ayaz, S., Biswas, M., y Dhali, M. K. (2018). Morphotectonic analysis of alluvial fan dynamics: comparative study in spatio-temporal scale of Himalayan foothill, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(2), 41.

- Bull, W. (2007). *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology*. Oxford : Blackwell Publishing.
- Burbank, D.W., Anderson, R.S., 2001. *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science Ltd. 2, 13-33; 8, 159-175.
- Colombo, F., & Aluviales, A. (2010). *Secuencias y modelos de sedimentación. Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria* (A. Arche; editor), 131-183
- Calvache, M., Viseras, C., y Fernández, J. (1997). Controls on fan development evidence from fan morphometry and sedimentology; Sierra Nevada, SE Spain. *Geomorphology*, 21(1), 69-84.
- Cossío, J. E. Q. (2014). *Parámetros morfométricos, geomorfológicos y correlación estructural en cinco cuencas hidrográficas de la Cuenca Amagá* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD EAFIT).
- Cox, R. (1994). Analysis of drainage-basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. *Geological Society of America Bulletin*, 571-581.
- Flórez, A. (2003). *Colombia: evolución de sus relieves y modelados*. In Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ciencias Humanas.
- Gómez-Gutiérrez, Á., Schnabel, S., Conoscenti, C., Caraballo-Arias., N.A.; Ferro, V., Di Stefano, C., Sanjosé, J.J., Angileri, S.E., De Matías, J., y Berenguer-Sempere, F. (2016). Elaboración de modelos 3D de diferentes morfologías y escalas utilizando técnicas Structure-from-Motion y fotografías terrestre. *REDIRIS Cuaternario y Geomorfología*, 30 (1-2), 23-35 [https:// doi:10.17735/cyg.v30i1-2.39594](https://doi.org/10.17735/cyg.v30i1-2.39594)
- Grosse, E. (1926). *Mapa Geológico de la parte occidental de la Cordillera Central de Colombia entre el Río Arma y Sacaoyal. Escala 1:50000. El Terciario Carbonífero de Antioquía*. Berlín.

- Hermelin, M. (2015). Landscapes and landforms of Colombia. In Landscapes and Landforms of Colombia. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0>
- Ibanez, D., Riccomini, C., y Pellon de Miranda, F. (2014). Geomorphological evidence of recent tilting in the Central Amazonia Region. *Geomorphology*, 214, 378-387.
- Jimenez, S.I., Ojeda, W., Ontiveros, R.E., Velazquez, J.F., Marcial, M.J., & Robles, D.B. (2017). Quantification of the error of digital terrain models derived from images acquired with UAV. *Cuantificación del error de modelos digitales de terreno derivados de imágenes adquiridas con UAV. Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(2), 85-100. doi: 10.5154/r.inagbi.2017.03.007
- Keller, E., y Pinter, N. (2002). Active Tectonics. Earthquakes, Uplift, and Landscape. (Segunda ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Lascarro Navarro, F. D., Lozada Molina, M. D., Manco Jaraba, D. C., & Rojas Martínez, E. (2020). Análisis estructural y morfotectónico al norte de Valledupar-Cesar, Colombia: contribución a los estudios de peligrosidad sísmica de la Falla Río Seco. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(2), 255–267. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052020000200255>
- Molano Cárdenas, S. M., & Torres Rodríguez, M. D. (2018). Índices geomorfológicos cómo herramienta para la caracterización de la actividad neotectónica del sistema de fallas de Soapaga entre los municipios de Corrales y Pesca.
- Mon, R. (1971). "Estructura Geológica del extremo austral de las Sierras Subandinas, Provincias de Salta y Tucumán, Rca. Arg.". *Asoc. Geol. Arg., Revista*, XXVI (2): 209-220.
- Oviedo Reyes, J. (2015). Geomorfología Tectónica del Sistema de Fallas del Zulia en el flanco occidental del Sinclinal del Zulia, Norte de Santander – Colombia. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Pepe, M., Fregonese, L., y Scaioni, M. (2018). Planning airborne photogrammetry and remote-sensing missions with modern platforms and sensors. *European Journal of*

Remote Sensing, 51(1), 412–435. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1444945>

Pérez Peña, J. (2009). GIS Based tools and methods for landscape analysis and active tectonic evaluation. Granada: Universidad de Granada.

Racca, J. M. (2007). ANÁLISIS HIPSOMÉTRICO, FRECUENCIA ALTIMÉTRICA Y PENDIENTES MEDIAS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO . Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología , 77 (1-2).

Schumm, S. (1986). Alluvial river response to active tectonics. Active tectonics, 80- 94

Suvires, G. M. (2013). Geomorfología tectónica y evolución del relieve en un sector del piedemonte occidental de la sierra Chica de Zonda, Precordillera Oriental, Argentina. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 324–335.

Toulia, E., Kokinou, E., y Panagiotakis, C. (2018). The contribution of pattern recognition techniques in geomorphology and geology: The case study of Tinos island (Cyclades, Aegean, Greece). European Journal of Remote Sensing, 51(1), 88–99. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1405716>

Valdivia Vera, W., Chacaltana Budiel, C., Chumpitaz Ramírez, M., Benites Cañote, A., & Peña Guimas, D. (2015). Caracterización morfoestructural en la proyección sur de la zona de transición entre las cuencas Santiago y Huallaga. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET.