

Análisis morfotectónico del Flanco Norte de la Sierra Nevada de Santa Marta a lo largo de la zona de influencia de la falla de Oca

Elaborado por:

Santiago Serrano Vinasco

Asesores:

Geólogo-PhD. José Fernando Duque Trujillo

Geólogo. José Daniel Gómez Álvarez

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias de la Tierra

Pregrado en Geología

Universidad EAFIT

Medellín, Colombia

2021

Tabla de Contenido

1. RESUMEN.....	5
2. INTRODUCCIÓN.....	6
3. GENERALIDADES.....	7
3.1. Planteamiento del problema.....	7
3.2. Pregunta de Investigación.....	8
3.3. Hipótesis.....	8
3.4. Objetivo general.....	8
3.5. Objetivos específicos.....	8
4. ZONA DE ESTUDIO.....	9
5. MARCO CONCEPTUAL O MARCO TEÓRICO.....	12
5.1. Análisis Topográfico:.....	13
5.2. Análisis De Frente de Montaña:.....	14
5.3. Análisis de la Cuenca de Drenaje:.....	14
6. METODOLOGÍA.....	17
6.1. Recopilación bibliográfica, cartografía geológica y análisis fotogeológico.....	17
6.2. Procesamiento de información y cálculo de los índices morfotectónicos.....	17
6.3. Análisis y comparación de resultados.....	18
7. RESULTADOS.....	19
7.1. Análisis Morfotectónico.....	19
7.1.1. Análisis Topográfico.....	19
7.1.2. Análisis de la Cuenca de Drenaje.....	22
7.1.3. Análisis KSN.....	25
7.2. Análisis Morfoestructural.....	27
7.2.1. Análisis de drenajes.....	27
7.2.2. Análisis de geoformas.....	28
8. DISCUSIÓN.....	30
8.1. Actividad tectónica.....	30
8.2. Estilo estructural.....	32
8.3. Riesgo sísmico.....	34
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	35
10. BIBLIOGRAFÍA.....	36

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.	9
Figura 2. Mapa geológico de la zona de estudio.	10
Figura 3. Ejemplo del trazado del frente de la montaña y la línea recta sobre el trazo del piedemonte para el cálculo del índice Smf. Letras Q describen abanicos	14
Figura 5. Esquema gráfico que da el soporte teórico a la aplicación del índice Bs.....	15
Figura 6. Esquema representado como se efectúa el basculamiento en una cuenca y como se refleja la asimetría	15
Figura 7. Respuesta del drenaje principal en donde se observa la migración del mismo, en sentido del basculamiento. Índice AF.....	16
Figura 8. Esquema metodológico usado para el desarrollo del proyecto.....	18
Figura 9. Mapa de elevación	19
Figura 10. Mapas de índices del análisis topográfico A) Integral hipsométrica, B) Relieve relativo, C) Pendiente promedio y D) Variabilidad de pendiente.....	21
Figura 11. Mapa de índice de forma de cuencas.....	23
Figura 12. Mapa de índice de asimetría de cuencas	24
Figura 13. Mapa de índice de KSN calculado en la red hídrica	25
Figura 14. Mapa de Índice de KSN Topográfico.....	26
Figura 15. Variación en la red de drenaje en la zona de estudio	27
Figura 16. Mapa de Geoformas	28
Figura 17. Mapa estructural de las regiones estructurales definidas a partir de características geométricas y cinemáticas propias.....	28
Figura 18. Mapa estructural de las regiones estructurales definidas a partir de características geométricas y cinemáticas propias	30

Índice de Tablas

Tabla 1. Índices morfotectónicos y morfométricos explorados en el estudio.....	12
--	----

1. RESUMEN

La actividad tectónica reciente se suele expresar a través de un conjunto de geoformas que permiten realizar una aproximación al grado relativo de esta misma. Estas características geomorfológicas, se manifiestan a diferentes escalas dentro de una región, por lo que es necesario aplicar diversas metodologías directas e indirectas para poder obtener un acercamiento más preciso. El presente trabajo busca caracterizar mediante un análisis cualitativo la actividad tectónica del flanco norte de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) a través de técnicas remotas, como lo son la fotogeología, teledetección y los sistemas de información geográfico (SIG). El uso de los índices morfotectónicos a partir de los SIG ayudan a evidenciar en zonas muy extensas y de difícil acceso, áreas puntuales que posean una mayor actividad tectónica sea para estudios preliminares o el desarrollo de estudios especializados que permitan ahondar para obtener un mejor detalle respecto al estado tectónico dentro de la zona de interés.

En este trabajo se caracteriza el grado de actividad tectónica relativa en el flanco norte de la SNSM, mediante la aplicación de 8 índices morfotectónicos y un análisis morfoestructural cualitativo. A partir del análisis de los índices morfotectónicos se encontró que la zona de estudio presenta una actividad tectónica evidenciada en dos dominios estructurales demarcados por patrones y confluencias observadas en las anomalías de los índices morfotectónicos. Un dominio de un régimen de rumbo dextral, relacionado con la dinámica de la falla de Oca y sus fallas satélites. Por otra parte, la parte central de la zona de estudio se encuentra relacionada con un dominio estructural de cabalgamiento asociado a la compresión y empuje de la placa Caribe, y la diferencia reológica dentro de la litología presente en este macizo rocoso.

En términos generales, estos resultados son útiles como estudios preliminares de actividad tectónica y funcionan como una herramienta para el estudio de deformaciones recientes, riesgo sísmico y definir el estilo estructural predominante en una zona en específico. Sin embargo, es necesario realizar una comprobación de campo con el fin de minimizar la incertidumbre e incidencia de factores como el clima y la litología que puedan llegar a distorsionar los resultados obtenidos.

2. INTRODUCCIÓN

La morfotectónica es la rama de la Geociencias que estudia la actividad tectónica durante el Cuaternario, además de relacionar de manera activa la Geomorfología y la Tectónica (Panizza, 1996). Antes de la Tectónica de placas se le atribuía el desarrollo del paisaje únicamente a causas exógenas tales como, la erosión o causas antrópicas. Sin embargo, en la actualidad se sabe que la actividad endógena expresada como la interacción de las placas tectónicas y los procesos geotectónicos resultantes de esta, son determinantes en el control de la configuración y evolución de la topografía actual (Scheidegger, 2004).

Puesto que la actividad tectónica reciente y los resultados que esta produce, tienen una influencia directa sobre la superficie terrestre, lugar donde la población desarrolla todas sus actividades y posee toda su infraestructura urbana, civil e industrial, es importante aplicar estudios que permitan realizar una evaluación preliminar en zonas potencialmente afectadas por la actividad neotectónica. Esta última se define como el estudio de los eventos tectónicos recientes que tienen influencia en la configuración de la topografía y que ocurren en una región debido a su régimen estructural actual o por la última reorganización tectónica importante (Pavlides, 1989).

En la mayoría de las cadenas montañosas relevantes a nivel mundial, por la interacción entre las fuerzas endógenas y exógenas, no es posible alcanzar un punto de equilibrio en el relieve por sus constantes cambios, y como resultado de esto se generan rasgos geomorfológicos y variaciones en la red hídrica a diferentes escalas. A partir del análisis morfoestructural del terreno y la aplicación de índices morfotectónicos, se puede cuantificar y parametrizar los rasgos topográficos y las características morfométricas de las cuencas de drenaje que tengan influencia sobre el lugar de interés, a causa de esto, es posible evaluar de manera eficiente el grado de actividad neotectónica en una zona de estudio en particular permitiendo identificar zonas de interés para el desarrollo de estudios posteriores con mayor detalle y trabajo de campo para mejorar el entendimiento de esta relación y sobre la influencia que esta potencialmente tenga (Panizza, 1996 y Keller, 2002).

En el presente trabajo se analizan las características morfológicas y estructurales del flanco norte de la SNSM mediante la aplicación de índices morfométricos, con el fin de realizar una caracterización morfotectónica que permita establecer el grado relativo de actividad tectónica y el estilo estructural bajo el cual está sometido esta región.

3. GENERALIDADES

3.1. Planteamiento del problema

Debido a que la Falla de Oca es una estructura tectónicamente activa (Audemard, 1995) se requieren índices geomorfológicos que puedan cuantificar esta actividad, como lo son los índices aplicados sobre la red hídrica, frentes de montaña o enfocados en resaltar anomalías topográficas, por ejemplo, el relieve relativo, pendiente promedio, entre otros (e.g. Botero, 2005; Oviedo, 2015; Aristizábal, 2016; Vulkanou, 2020.) Ya que son una de las herramientas principales en análisis morfotectónicos, y que permiten cuantificar características del terreno, que se ven afectadas directamente por la actividad tectónica (desplazamiento, subsidencia, exhumación, basculamiento) facilitando la medición y visualización del grado relativo de actividad tectónica reciente en una zona en particular (Burbank et al., 2012).

En el bloque Norandino, específicamente al norte de Colombia, se encuentra la cadena montañosa más alta sobre el nivel del mar (*Figura 1*), la Sierra Nevada de Santa Marta. Este sistema montañoso, con una altura máxima de 5.700 msnm, es un macizo rocoso dividido en tres terrenos definidos como Sierra Nevada, Sevilla y Santa Marta (Tschanz et al., 1974). En donde se encuentra predominancia litológica metamórfica e ígnea. Además, se encuentra controlada tectónicamente al norte por la falla Oca, al suroeste por la falla Santa Marta-Bucaramanga y por un sistema de fallas inferido, en la depresión de la cuenca Cesar-Ranchería al sureste (Tschanz et al., 1969).

Ya que no es claro cómo fue la formación de la Sierra Nevada de Santa Marta, se han propuesto dos modelos de evolución que son los más discutidos. Cediél et al. (2003) Proponen un modelo autóctono, el cual sostiene que los bloques tectónicos se formaron cerca a su disposición espacial actual. La teoría contraria, soportada por autores como Montes et al., (2005, 2012) defienden un modelo alóctono y postulan que los bloques tectónicos se explican debido a un desplazamiento geográfico a través del sistema de fallas, generado por la interacción entre las placas Caribe y Suramericana.

La placa Caribe converge en una dirección SW de manera oblicua al Bloque Suramericano, a una velocidad aproximada de 1-2 cm/año (Audemard, 1995). Esta confluencia de placas es la responsable del modelamiento estructural a nivel regional en el norte de Colombia (Taboada et al., 1998). La falla de Oca, se extiende desde Santa Marta, por más de 650 km hasta Boca Aroa en Venezuela. Este se comprende como un sistema de fallas de estructura linear simple, con fallas satélites asociadas, en su mayoría, inversas de bajo ángulo (Colmenares et al., 2007). La falla de Oca es una estructura transpresiva con movimiento dextral, y posee una tasa de movimiento promedio de 2 mm/año (Audemard, 1995).

La ciudad de Santa Marta y sus alrededores, poseen antecedentes históricos de sismos catastróficos, como el sismo de 1834 reconocido por los daños que ocasiono, adicionalmente posee la mayor concentración de población del departamento del Magdalena con aproximadamente 521.219 habitantes (Dane, 2019) y se encuentra en la zona de influencia de la falla de Oca. Este acercamiento morfotectónico a través de sistemas de información geográfica cobra especial relevancia, ya que actualmente además de su alta densidad poblacional, la ciudad posee uno de los puertos marítimos más importantes a nivel nacional, (aporta un 12% al PIB de la región) representando un punto vital para la distribución e importación de mercancía hacia los departamentos del interior del país.

Es posible utilizar este tipo de estudios preliminares para identificar zonas con alto potencial para el desarrollo de estudios más específicos, como trincheras paleo sísmicas, ubicación de nuevas estaciones de registro sísmico o de registro geodésico. Con la finalidad de comprender mejor los procesos por los que se dieron estos fenómenos naturales en el pasado y así, poder tener una mejor preparación y entendimiento para eventos similares en el futuro.

3.2. Pregunta de Investigación

- ¿Qué relación existe entre la configuración tectónica actual y los rasgos geomorfológicos del flanco norte de la SNSM?
- ¿La actividad tectónica en el flanco norte de la Sierra Nevada de Santa Marta puede ser cuantificada a partir del uso de índices morfotectónicos?

3.3. Hipótesis

Se pueden identificar variaciones de la actividad tectónica reciente en el flanco norte de la Sierra Nevada de Santa Marta mediante los índices morfotectónicos.

3.4. Objetivo general

- Aplicar índices morfotectónicos que permitan caracterizar la actividad tectónica del flanco norte de la Sierra Nevada de Santa Marta y analizar la relación entre sus rasgos geomorfológicos y la configuración tectónica actual.

3.5. Objetivos específicos

- Mediante la aplicación de índices morfotectónicos, cuantificar la actividad tectónica relativa asociada a la Falla de Oca en el flanco norte de la Sierra Nevada de Santa Marta.
- Identificar rasgos morfoestructurales asociados a la actividad tectónica reciente a lo largo de la falla de Oca.
- Reconocer puntos con alto potencial neotectónico para la evaluación del riesgo sísmico en la ciudad de Santa Marta.

4. ZONA DE ESTUDIO

La Sierra Nevada de Santa Marta se encuentra ubicada al norte de Colombia, limitando con la costa Caribe y los departamentos del Magdalena, Cesar y la Guajira (Figura 1) Entre las latitudes norte $10^{\circ} 01' 05''$, $11^{\circ} 22' 11''$, y las longitudes al oeste del meridiano de Greenwich $72^{\circ} 36' 16''$, $74^{\circ} 12' 49''$ (Cortes, 2013) Específicamente, la zona de estudio comprende el flanco norte de este macizo montañoso, desde Santa Marta en el occidente a lo largo de toda la troncal del Caribe hasta la desembocadura del río Dibulla. La SNSM posee una altura máxima de 5765 msnm en el pico Colón, siendo el macizo litoral más grande de Colombia y el mundo.

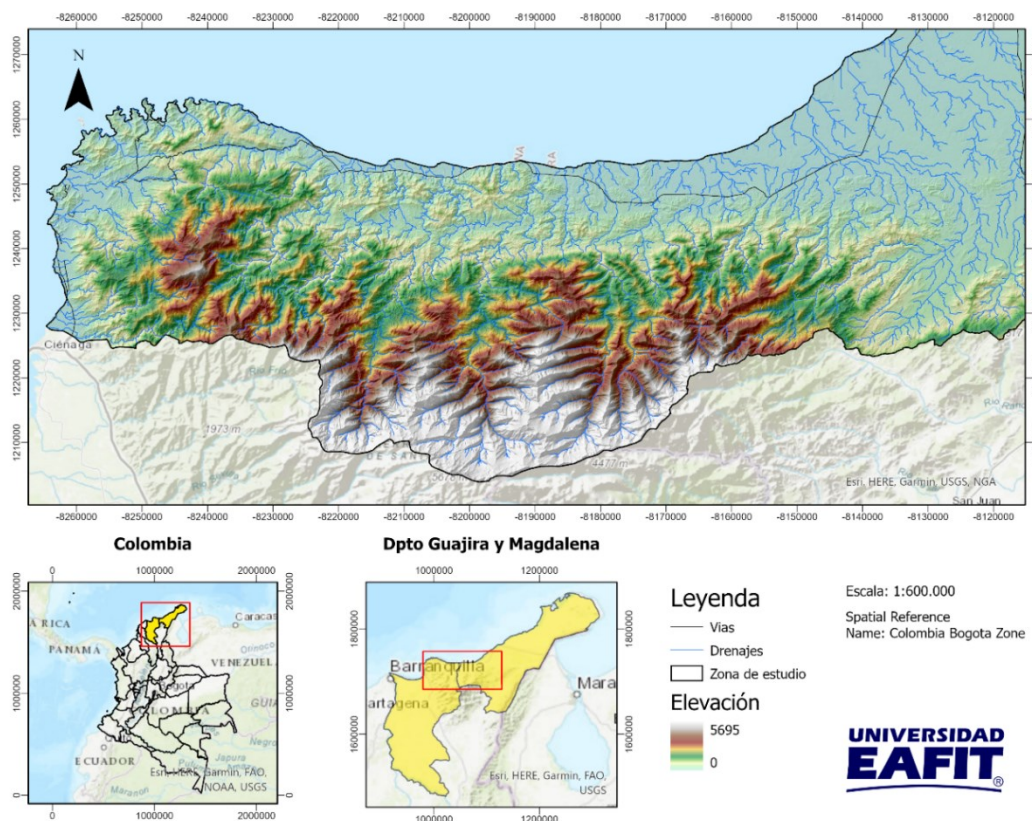


Figura 1. Mapa de localización de la zona de estudio.

Geológicamente la SNSM (Tschanz et al., 1974) la separo en tres provincias geotectónicas, caracterizadas principalmente por edad, litología y lineamientos bien marcados asociados a fallas que permitieron diferenciarlas. Llamadas; Sierra Nevada, Sevilla y Santa Marta (Figura2). (III) Provincia Sierra Nevada, que es la más antigua, posee un basamento cristalino, constituido principalmente por granulitas y migmatitas precámbricas, intruidas por rocas jurásicas y en su mayoría cubiertas por sedimentos depositados en el paleozoico. (II) Provincia de Sevilla se reconoce como un cinturón polimetamórfico, y la conforman neises y esquistos acoplados en una dirección preferencial NE-SW de edad Paleozoica. (I) Provincia de Santa Marta, es la más cercana a la costa y se extiende paralelo a la provincia de Sevilla. Se compone principalmente de dos cinturones metamórficos, la franja más costera de anfibolitas, filitas y esquistos verdes. Y la franja interna por esquistos micáceos principalmente (Tschanz et al, 1974).

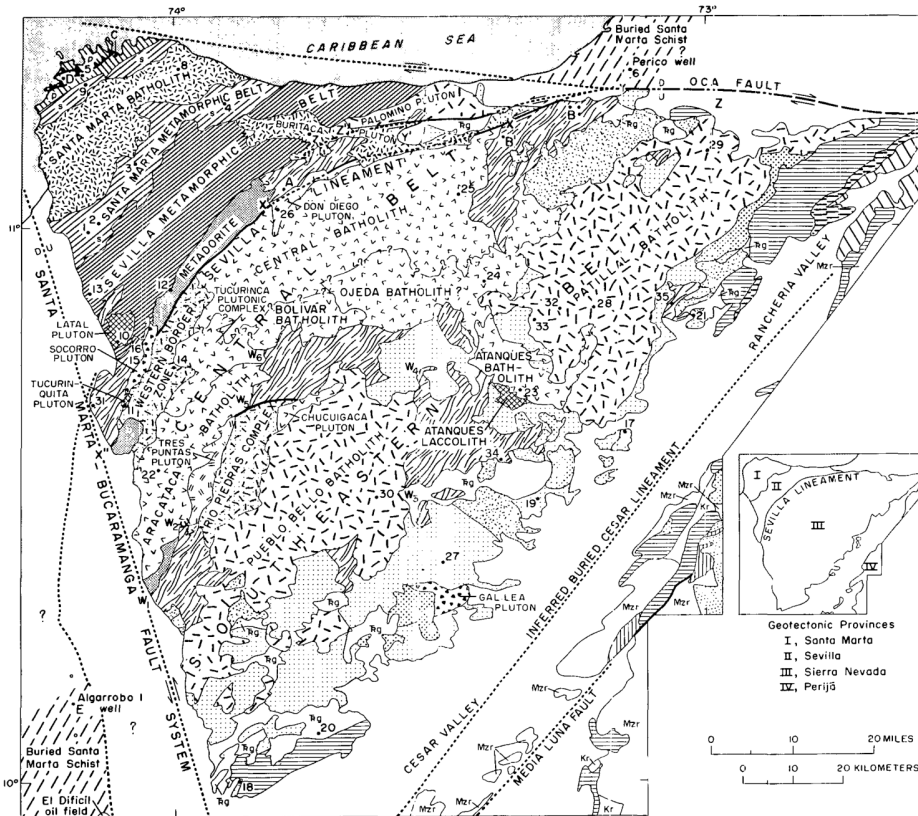


Figura 2. Mapa geológico tomado de (Tschanz, 1974).

La SNSM, se expresa geomorfológicamente como un triángulo y se encuentra limitado estructuralmente al NW por el sistema de fallas Santa Marta–Bucaramanga, el NE por la cuenca Cesar Ranchería, y al N por la falla de Oca (Figura 2). A nivel general, la zona se encuentra controlada por fallas transcurrentes e inversas, con una tendencia principal NE y EO y con vergencia al N y S (Cortes, 2013).

Adicionalmente, la SNSM se encuentra sobre un margen convergente entre las placas Caribe y la Sudamericana. Este macizo rocoso ha evolucionado tectónicamente, y como resultado se evidencian irregularidades en el mecanismo, geometría y dinamismo en la zona. Como se observa en la figura 3, las fallas que poseen mayor influencia sobre la zona de estudio y la ciudad de Santa Marta son;

Falla de Oca

Abarca una amplia extensión desde el norte de la Sierra Nevada de Santa Marta, pasando por la Guajira, hasta la frontera con Venezuela aproximadamente, en sentido EW, también, exhibe un desplazamiento dextral en la parte occidental junto con una componente vertical marcada por el levantamiento de la Sierra Nevada de Santa Marta en relación con la península de La Guajira. Además, con la excavación de trincheras, se han encontrado desplazamientos dextrales relativamente nuevos en dicha falla, que aún se encuentran sin cuantificar. La actividad sísmica conocida cerca de la falla es muy tenue y por tanto poco significativa. Algunos estudios realizados en la zona arrojan valores aproximados a tasa de movimiento de 5 mm/año.” (INGEOMINAS, 2007 & Alfaro, 2014).

5. MARCO CONCEPTUAL O MARCO TEÓRICO

La Morfotectónica es una rama de las geociencias que se enfoca principalmente en estudiar la actividad tectónica en un marco temporal geológico reciente, es decir, del cuaternario (~ 2,59 Ma) y como esta deformación se ve reflejada en el paisaje, por lo que posee una estrecha relación con la geomorfología y la neotectónica (Bull, 2007).

Los índices morfométricos son el mecanismo mediante el cual se analizan de manera cuantitativa las características y particularidades como la forma, tamaño y el cambio o evolución de algún factor. Para este caso específico, los índices utilizados miden la actividad tectónica reciente teniendo en cuenta las variaciones en el relieve, erosión, los patrones de drenaje y forma de cuenca, todo esto, con el fin de entender si dicha evolución se relaciona con la actividad del sistema de fallas o la falla en específico de interés (Keller, 2002).

Debido a que el terreno responde no solo ante cambios ambientales si no tectónicos, esta rama se ha enfocado en complementar y desarrollar índices que tengan la capacidad de cuantificar la respuesta geomorfológica ante variaciones de la actividad tectónica en la zona de interés (Daxberger, 2015).

A continuación, (Tabla 1) se mencionan y definen algunos de los índices morfométricos, su principio físico y respaldo matemático bajo el cual se rige, cómo se calcula y como se pueden interpretar en los estudios morfotectónicos.

Tabla 1. Índices morfotectónicos y morfométricos explorados en el desarrollo del estudio.

Índice	Formula	Descripción	Fuente
Relieve Relativo	$Rr: Hmax-Hmin$	Hmax: elevación máxima Hmin: elevación mínima	(Strahler, 1952)
Pendiente Promedio (SV)	$Sv: slopemax-slopemin$	Smax: Pendiente máxima Smin: Pendiente mínima	(Ruszkiczay-Rüdiger, 2009)
Integral Hipsométrica (Hi)	$H=(hmean-hmin)/(hmax-hmin)$	Hmean; Altura promedio Hmax: elevación máxima Hmin: elevación mínima	(Strahler, 1952)
Sinuosidad de frente de montaña (Smf)		Lj: Línea de frente de montaña	(Bull, 2007)

	$S_{mf} = L_j / L_s$	Ls: Línea recta sobre Lj	
Índice de verticalidad o Steepness Index (KSN)	$S = K_{sn} - \theta_{ref}$	KSN: Índice de verticalidad de canal normalizado	(Hack, 1973)
Forma de la Cuenca (Bs)	$B_s = B_L / B_w$	Bl: Longitud de la cuenca en línea recta Bw: Área de la cuenca	(Ramírez-Herrera, 1998)
Factor de Asimetría (Af)	$A_f = 100 [A_R / A_t]$	Ar: Área de la cuenca al lado derecho Al: Área de la cuenca al lado izquierdo	(Hare, 1985)

Basados en el principio que, el terreno responde ante los cambios medio ambientales y tectónicos que provocan alteraciones en el nivel base (Figuroa, 2010). Se han definido índices morfométricos que describen las propiedades de la topografía, la red hídrica y los frentes de montaña. Estos índices permitan cuantificar la respuesta geomorfológica ante variaciones en la actividad tectónica (Usta, 2015), por lo tanto, el valor de estos índices y su distribución espacial dan pie al reconocimiento y diferenciación de zonas con un grado de control tectónico diferente. (Demoulin, 2011).

5.1. Análisis Topográfico:

Relieve Relativo o relieve local: se define como la diferencia entre la altura de la cota máxima y mínima para el área de estudio. Este índice se puede usar para observar la velocidad relativa de movimientos tectónicos verticales, siendo útiles para encontrar zonas de actividad específicas sobre los sistemas de fallas. (Ruszkiczay-Rüdiger, 2009).

Pendiente Promedio: Es la primera derivada de los datos de elevación, es el cambio de elevación en determinado ángulo sobre las líneas de contorno, y la variabilidad de la pendiente se refiere a la diferencia entre el mínimo y máximo de pendiente en cierta área. (Ruszkiczay-Rüdiger, 2009).

Integral hipsométrica: Es un indicador que es usado comúnmente para observar la cantidad relativa de tierra debido a la erosión desde el tope hasta la base de la montaña (Shahzad, 2011) (Ruszkiczay-Rüdiger, 2009).

5.2. Análisis De Frente de Montaña:

Sinuosidad de frente de montaña (SMF): Este índice relaciona la longitud de una línea que esta sobre el trazo del frente de montaña o piedemonte (L_j) (Figura 3) y una línea recta imaginaria sobre el trazo que delimita el piedemonte (L_s) (Bull, 2007).

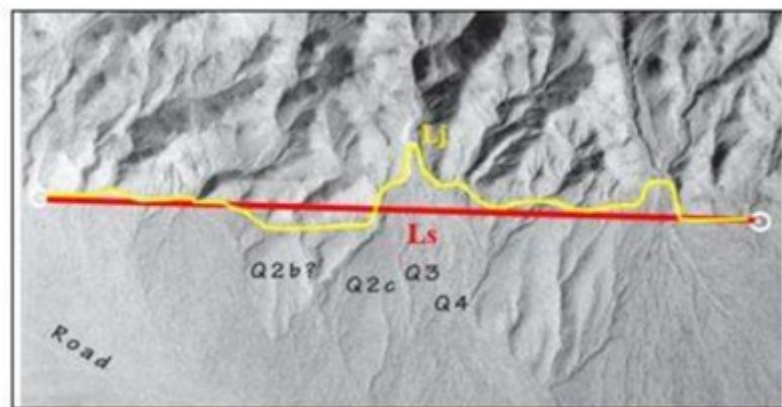


Figura 3. Ejemplo del trazado del frente de la montaña y la línea recta sobre el trazo del piedemonte para el cálculo del índice Smf. Letras Q describen abanicos (Bull, 2007).

5.3. Análisis de la Cuenca de Drenaje:

Índice de verticalidad o Steepness Index (KSN): este índice es útil debido a que se encuentra relacionado directamente con la tasa de levantamiento tectónico y esta puede variar entre las zonas de estudios debido a las diferencias en los procesos erosivos dominantes y distribución en frecuencia y magnitud de escorrentía.

Forma de la cuenca (BS): Se enfoca en cuantificar la elongación de la cuenca de drenaje y se calcula; donde BL es la longitud de la cuenca medida desde la boca hasta la divisoria de aguas más distante y Bw es el ancho de la cuenca medido en el eje transversal en su lugar más ancho (Figura 5).

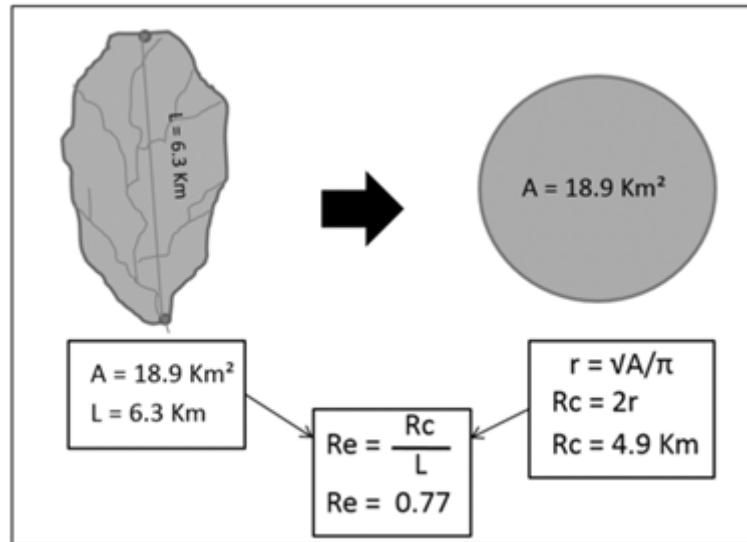


Figura 4. Esquema gráfico que da el soporte teórico a la aplicación del índice Bs (tomado de (Oviedo Reyes, 2015)

Factor de Asimetría (AF): Este índice permite reconocer la asimetría de las cuencas en la zona de estudio que se encuentren afectadas debido al basculamiento tectónico del terreno, en donde tiene como resultado una deformación en la forma de la cuenca. (Figura 6 y Figura 7) En la fórmula del índice, A_r es el área total de la cuenca localizada a mano derecha del cauce aguas abajo de la corriente principal, y A_l es el área total de la cuenca (Keller, 2002).

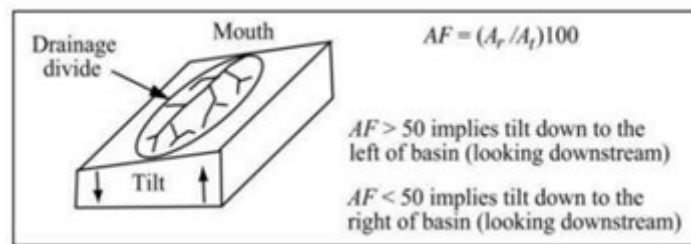


Figura 5. Esquema representado como se efectúa el basculamiento en una cuenca y como se refleja la asimetría (Molin, 2004).

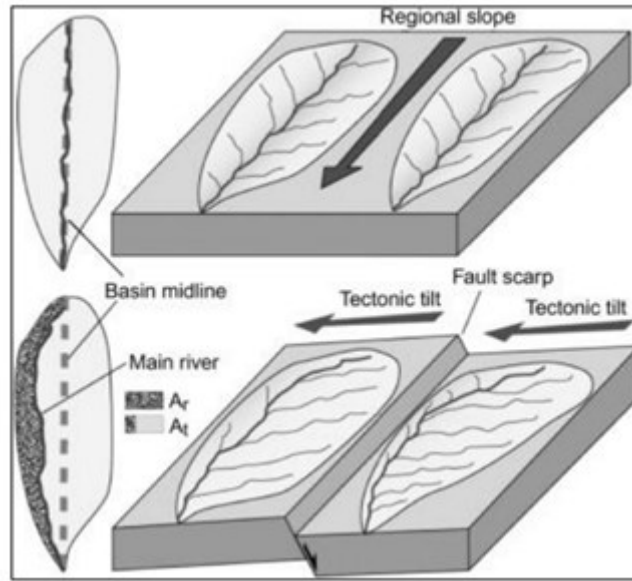


Figura 6. Respuesta del drenaje principal en donde se observa la migración del mismo, en sentido del basculamiento. Índice AF. Tomado de (Keller, 2002).

6. METODOLOGÍA

Para la caracterización de la actividad tectónica a lo largo de la zona de influencia de la Falla de Oca se aplicó una metodología que consistió en tres fases; La primera fase, se realizó una fotointerpretación de imágenes satelitales con diferente resolución (12.5 y 30 m) y la integración de la información recopilada a una GBD (Geodatabase) para obtener mapas morfoestructural, geológico y tectónico. La segunda fase, en donde se desarrolló la extracción de parámetros topográficos y el cálculo de los índices morfotectónicos con base en un modelo digital de elevación (DEM) y la última fase, la cual se desarrolló una comparación de los resultados y patrones de los índices calculados con la información morfoestructural para poder resaltar zonas con una mayor actividad tectónica y estimar su grado de actividad tectónica relativa.

6.1. Recopilación bibliográfica, cartografía geológica y análisis fotogeológico

Para el desarrollo de la primera fase se realizó una búsqueda y recopilación bibliográfica que respaldaran el fundamento teórico y la definición de los índices morfotectónicos, así como antecedentes de trabajos realizados aplicando la misma técnica. Posterior a esto, se procedió a descargar todos los metadatos del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) de las planchas geológicas 1:100.000 (11,12,13,14,18), con el fin de capturar la información litológica, tectónica, hídrica y topográfica de la zona.

Con base a la información anterior, se realizó un análisis morfoestructural a partir de las imágenes satelitales descargadas directamente de la página de la agencia de exploración aeroespacial japonesa (JAXA), del satélite ALOS World 3D (AW3D30) y tratadas a partir del software ArcGIS PRO, el cual estuvo orientado a mejorar el trazado de las fallas que se tienen en la cartografía nacional, así como la definición y marcación de geoformas asociadas al ambiente estructural transcurrente a la que se encuentra sometida la zona de estudio.

6.2. Procesamiento de información y cálculo de los índices morfotectónicos

Esta fase consistió principalmente en el procesamiento de los datos, la cual se subdividió en 3 pasos; el primer paso, fue la consolidación de la GDB, para poder visualizar la información recopilada del SGC y el IGAC, a partir de ahí. Se realizó un análisis morfoestructural donde se definieron geoformas en shapefiles en el ArcGIS PRO, asociadas al régimen estructural bajo el cual se encuentra sometido la SNSM, es decir, transpresivo, y se encontraron lagunas de fallas, ganchos de flexión, valles lineales, drenajes disectados entre otros. Todo esto con el fin de poder analizar gráficamente la relación que hay entre la topografía actual y la actividad tectónica relativa que posee la zona.

En el segundo paso, se realizó a partir del procesamiento de los datos en el software Matlab, con el uso de códigos preexistentes aplicados con modificaciones para una mejor visualización final de los datos sobre el DEM de 30m, en este software se calcularon los índices de verticalidad (KSN), se extrajo la red hídrica y se definieron las cuencas hidrográficas, que se obtuvieron para compararlas con la zonificación hidrográfica del 2013, para un resultado más acertado.

En el tercer paso, se calcularon los índices topográficos [relieve relativo (Rr), pendiente promedio (SV), variabilidad de la pendiente (Sv), integral hipsométrica (Hi)], KSN y los índices enfocados a análisis de cuencas [Forma de la cuenca (Bs), factor de asimetría (Af)]. Estos cálculos se realizaron en varias herramientas de geoprocésamiento en el software ArcGIS PRO, como estadísticas focales para los análisis topográficos y para el análisis de cuencas el uso de la calculadora de ráster para obtención de parámetros necesarios para el desarrollo de los mismos.

6.3. Análisis y comparación de resultados

En la fase final, se realiza un análisis a los resultados de los índices morfotectónicos y se hace una integración con el análisis morfoestructural y los rasgos geomorfológicos identificados para una caracterización de la actividad neotectónica de la zona de estudio.

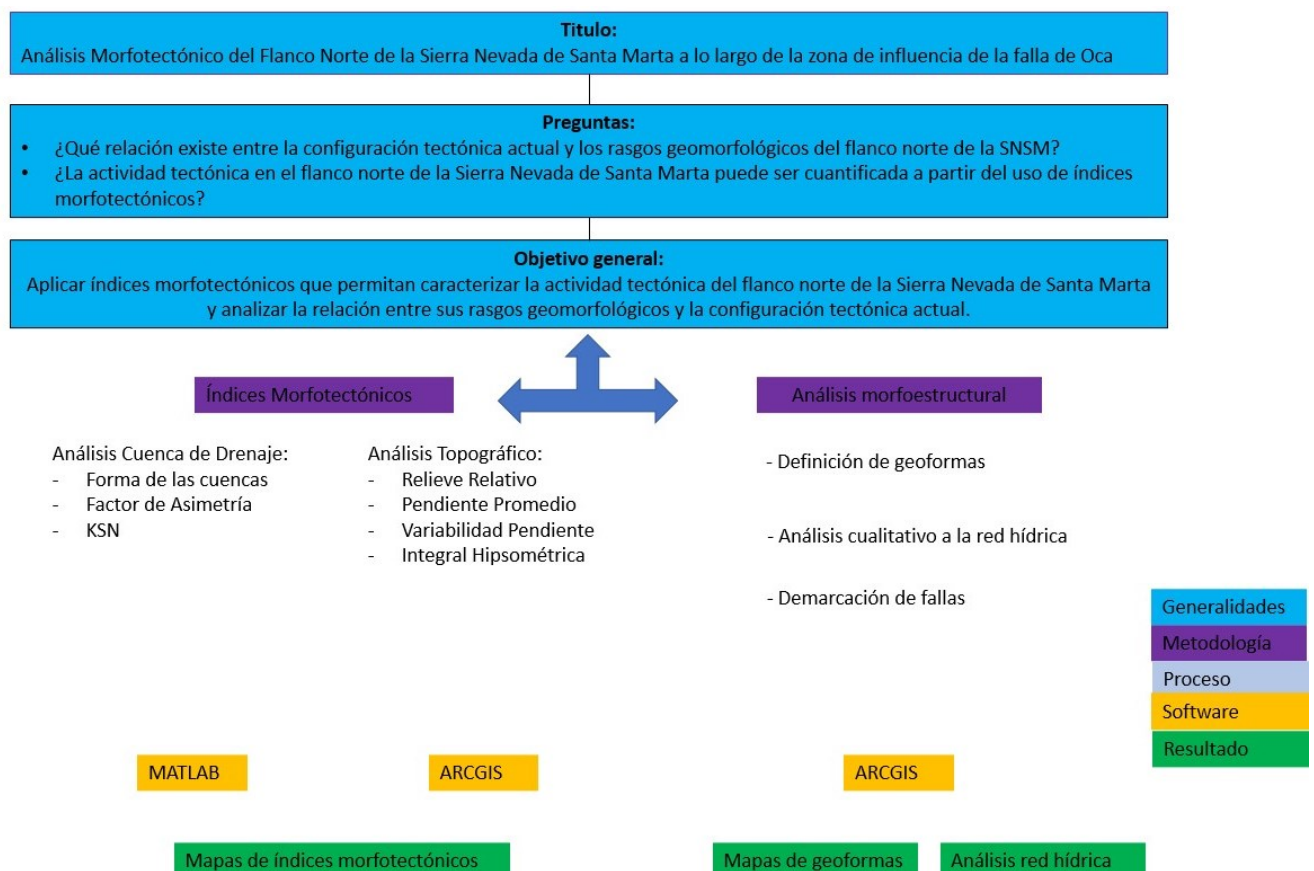


Figura 7. Esquema metodológico usado para el desarrollo del proyecto (Elaboración propia).

7. RESULTADOS

7.1. Análisis Morfotectónico

7.1.1. Análisis Topográfico

En el área de estudio se observa en la Figura 9, que la zona con altitudes mayores se encuentra hacia la parte sur de la zona de estudio o en su defecto, en la parte central de la Sierra Nevada de Santa Marta, siendo la altura máxima de 5695 metros sobre el nivel del mar en el pico Colón. Las partes más bajas se encuentran próximas a la costa del mar Caribe, y se encuentran asociadas a los valles de los ríos de la región más representativos, como lo son el río Buriticá, Dibulla, Don diego, Palomino hacia el sector norte y el más importante hacia el occidente, el río Manzanares.

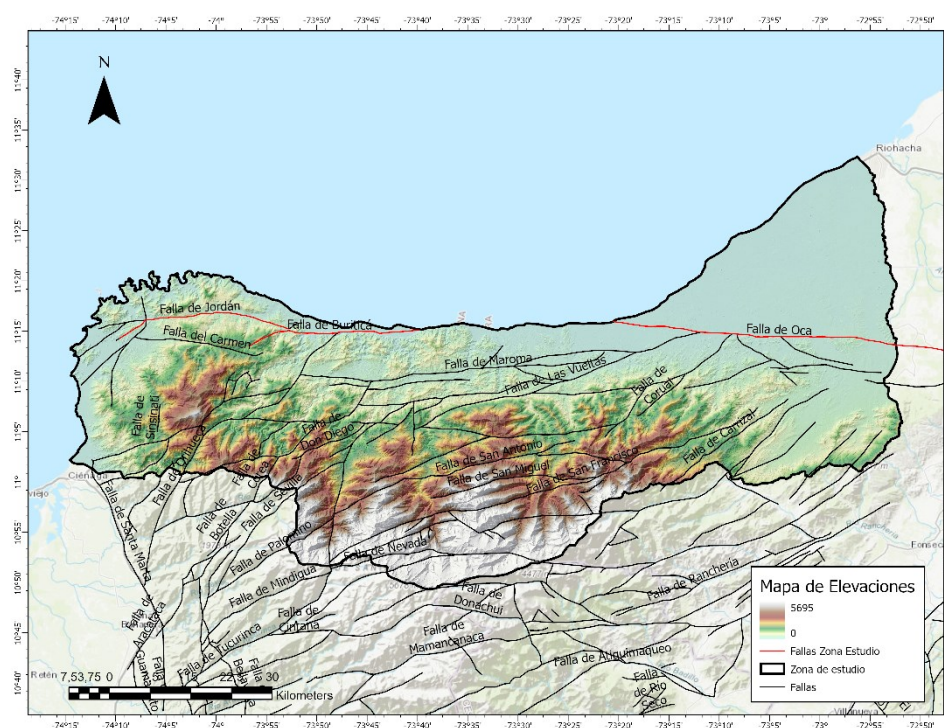


Figura 8. Mapa de elevación (Elaboración propia).

El análisis topográfico de la zona de estudio fue realizado a partir de la aplicación de los índices morfotectónicos sobre el modelo digital de elevación (DEM) (Figura 9). En el mapa de la integral hipsométrica (Hi) (Figura 10. A), se observan valores muy altos sobre la zona central principalmente, donde los filos estructurales se encuentran afectadas por la alta densidad de fallas, principalmente de componente inversa que dejan expuesto el contraste litológico entre rocas metamórficas de la provincia de Sevilla y el batolito granulítico, adicionalmente, los valores altos se encuentran con un patrón que tiende a conservarse NS-NE principalmente.

Los valores bajos del H_i , se encuentran en las zonas más próximas a la parte más cercana a la costa y sobre las partes de menor altura. Adicionalmente se sobreponen con los trazos de las fallas que poseen una componente dominante de transurrencia, precisamente la falla de Oca, falla Maroma y la falla de Jordán. Se observa una concentración importante en la zona occidental sobre la ciudad de Santa Marta y las veredas cercanas a la misma, estos valores conservan la orientación WE de las fallas.

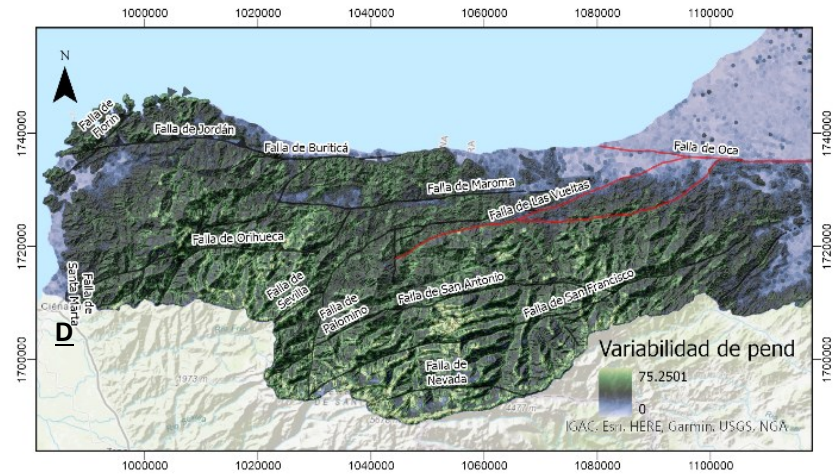
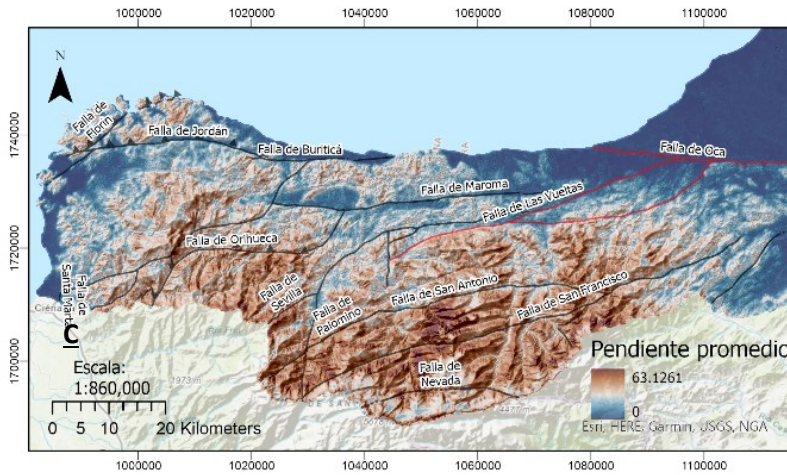
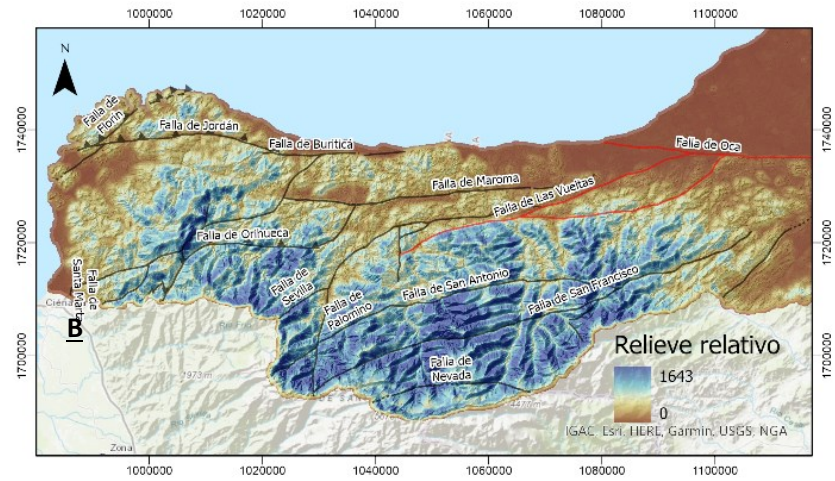
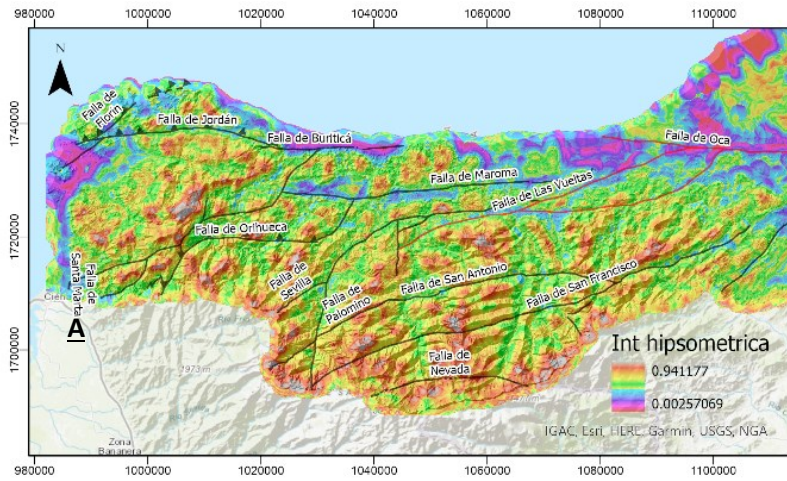


Figura 9. Mapas de índices del análisis topográfico A) Integral hipsométrica, B) Relieve relativo, C) Pendiente promedio y D) Variabilidad de pendiente (Elaboración propia).

El mapa de relieve relativo (Rr) (Figura 10.B), evidencia una separación de 3 zonas principalmente. Una concentración de valores altos en la zona central en donde se puede apreciar una orientación preferencial en sentido NE-SW, adicionalmente en la parte más cercana a la costa y hacia la zona oriental marca la separación topográfica entre la terminación de la provincia de Santa Marta, caracterizada por rocas cristalinas del basamento con una mayor dureza y rocas metamórficas con una mayor ductilidad y que se encuentran asociadas a el trazo de la falla de Oca. Y hacia la zona occidental marcan los valores más bajos como en Hi, la zona urbana de la capital del Magdalena, estos mismos valores se observan entre el pie de monte y la línea de costa, por lo que se puede decir que tienen un aumento gradual con la altura hacia el sur de la zona de estudio.

El mapa de pendiente promedio (Figura 10.C) y el de variabilidad de pendiente (Figura 10.D), evidencian cambios en los valores muy drásticos en la zona más cercana a la costa, esto se ve reflejado a lo largo de la zona de estudio en el control estructural que ejercen las fallas sobre la topografía y los cambios litológicos que presenta.

Se observa una concentración de valores bajos en la zona occidental cerca de la bifurcación de la falla de Maroma y de Jordán en la zona del corregimiento de Gaira, ubicado al SW de la ciudad de Santa Marta y en zonas de menor altura y con una menor pendiente. Los valores altos en esta zona se ubican principalmente en los altos estructurales y superficies de erosión.

7.1.2. Análisis de la Cuenca de Drenaje

La forma de las cuencas (Bs), clasificado según (Gaspari et al., 2012), como se muestra en la figura 11, muestra que las cuencas que poseen mayor elongación y valores mayores a 1.75, se encuentran ubicadas en el sector occidental, asociadas a los ríos Buriticá y Manzanares y se encuentran sobre los cinturones metamórficos de Sevilla y Santa Marta, dentro de este sector se observa que hay dos cuencas con forma circular y se encuentran sobre la provincia más joven relacionada con el batolito de Santa Marta. Sin embargo, en el sector occidental sobre el río Tapiás y el Corual, se encuentra la cuenca circular más grande de la zona de estudio.

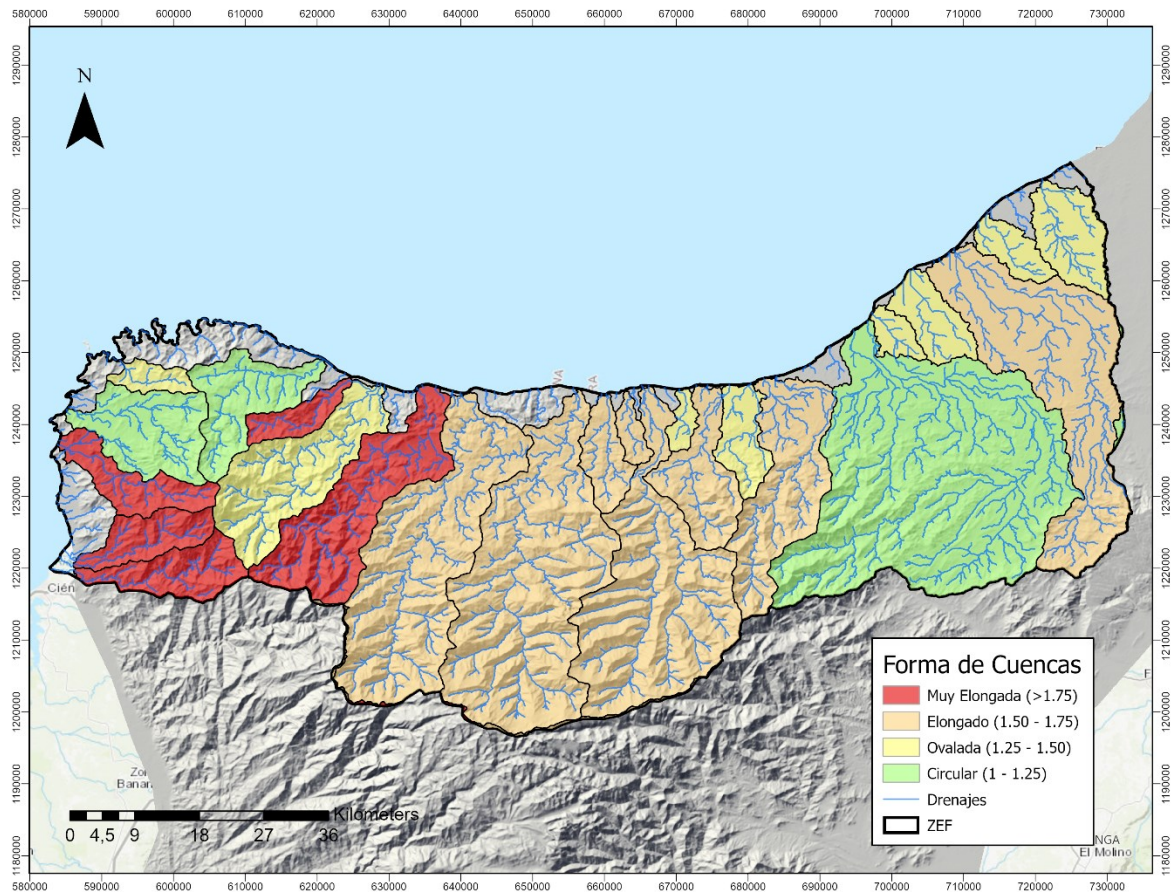


Figura 10. Mapa de índice de forma de cuencas (Elaboración propia).

En la zona central se observan predominancia de cuencas elongadas con valores entre (1.50-1.75) y son las cuencas que predominan sobre la zona de estudio. Se encuentran sobre la provincia de Sevilla y Santa Marta, y se encuentran relacionadas sobre los ríos Palomino, Don Diego, Palomino y Dibulla.

El factor de asimetría (A_f) como se observa en la figura 12, fue clasificado en cuatro clases basado en (Pérez-Peña et al., 2010), y se observa que las cuencas con mayor simetría son las de menor área, con red de drenaje corta y se encuentran de color azul oscuro. Las cuencas poco asimétricas se observan concentradas principalmente en el costado occidental de la zona de estudio asociado a los ríos Manzanares y Piedras con variación en su dirección preferencial, aunque se pueden observar otras tres cuencas dispersas con sentido NS al sector oriental y se encuentran con un color azul claro.

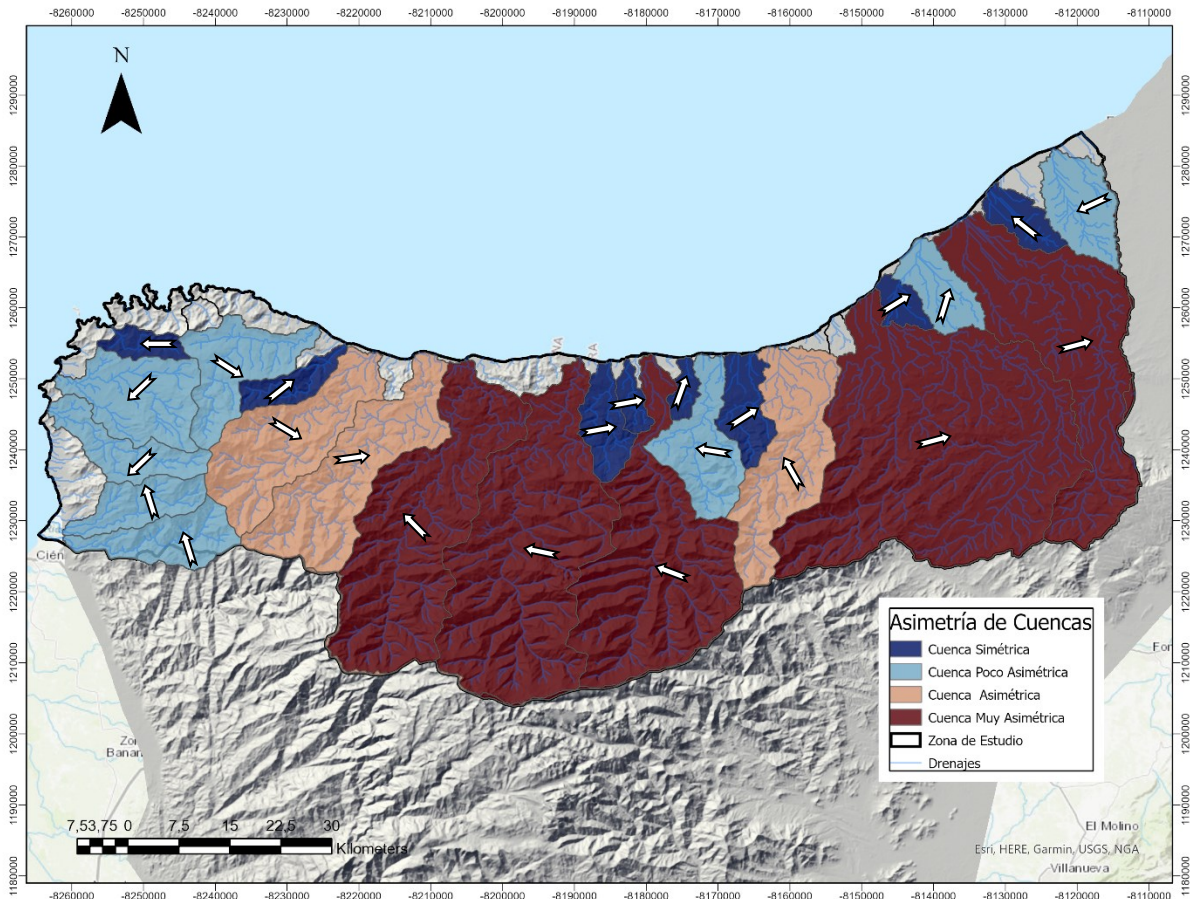


Figura 11. Mapa de índice de asimetría de cuencas (Elaboración propia).

Las cuencas con un Af de mayor valor o con mayor asimetría, se encuentran sobre la zona central y oriental en color rojo, son las de mayor área y se encuentran en la zona con mayor densidad de fallas, principalmente en su zona sur a la falla de San Francisco y en la parte proximal a la costa, a la falla de Oca, Maroma y Buriticá. Se puede observar que las cuencas con mayor asimetría en la zona central, poseen una tendencia en dirección NW, mientras que en la parte oriental poseen una tendencia en sentido NE.

7.1.3. Análisis KSN

En la figura 13 se muestran los drenajes coloreados según el valor del índice del KSN y se clasifico en 5 grupos según el método de Natural Breaks (Jenks, 1967) y van de valores desde 0 hasta < 220.

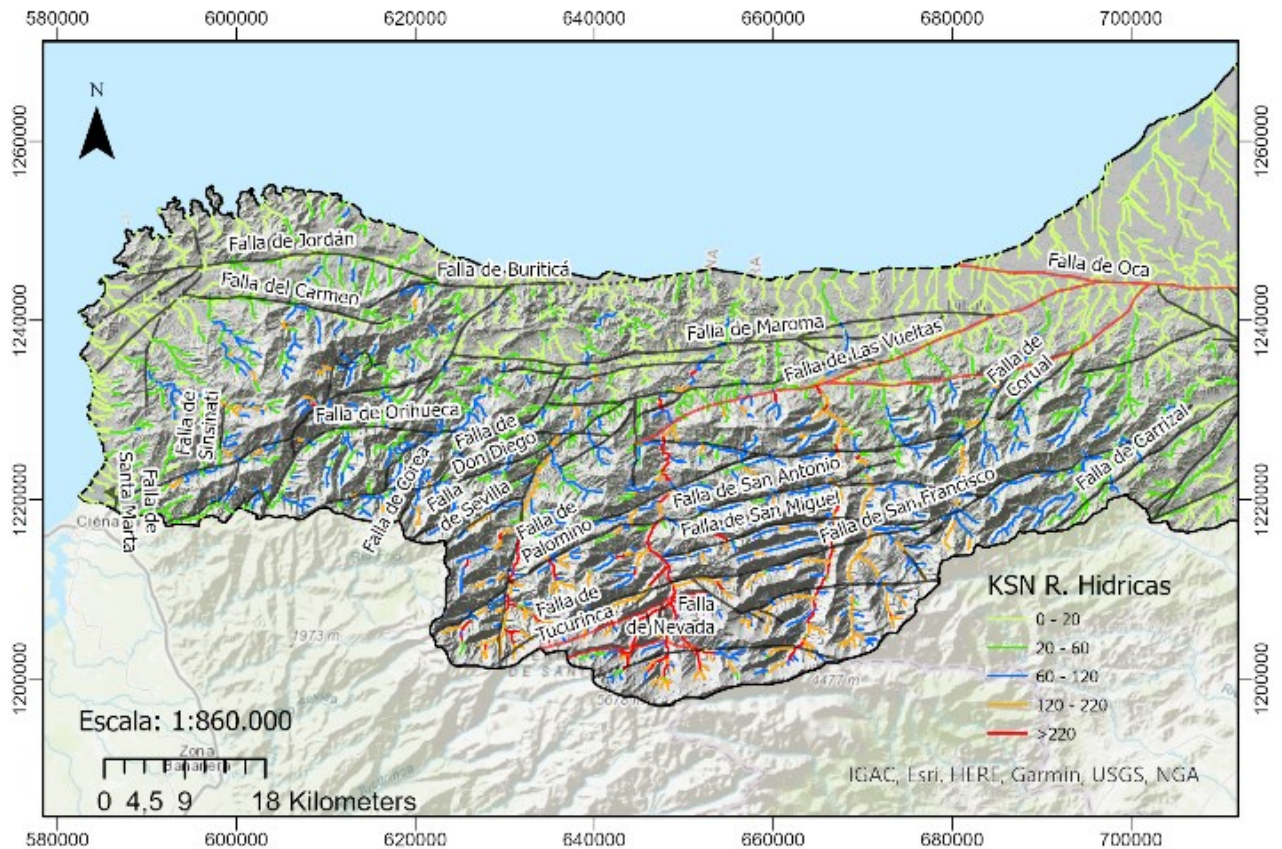


Figura 12. Mapa de índice de KSN calculado en la red hídrica (Elaboración propia).

Se observan que los drenajes con mayor valor (>220) se encuentra ubicado a la zona más central de la zona de estudio y se encuentra asociado a los nacimientos de los ríos de Palomino, Don Diego y río Ancho, donde se encuentra mayor influencia y densidad de fallamiento inverso, correspondiente a las fallas de Palomino, Tucurínca y San Francisco principalmente.

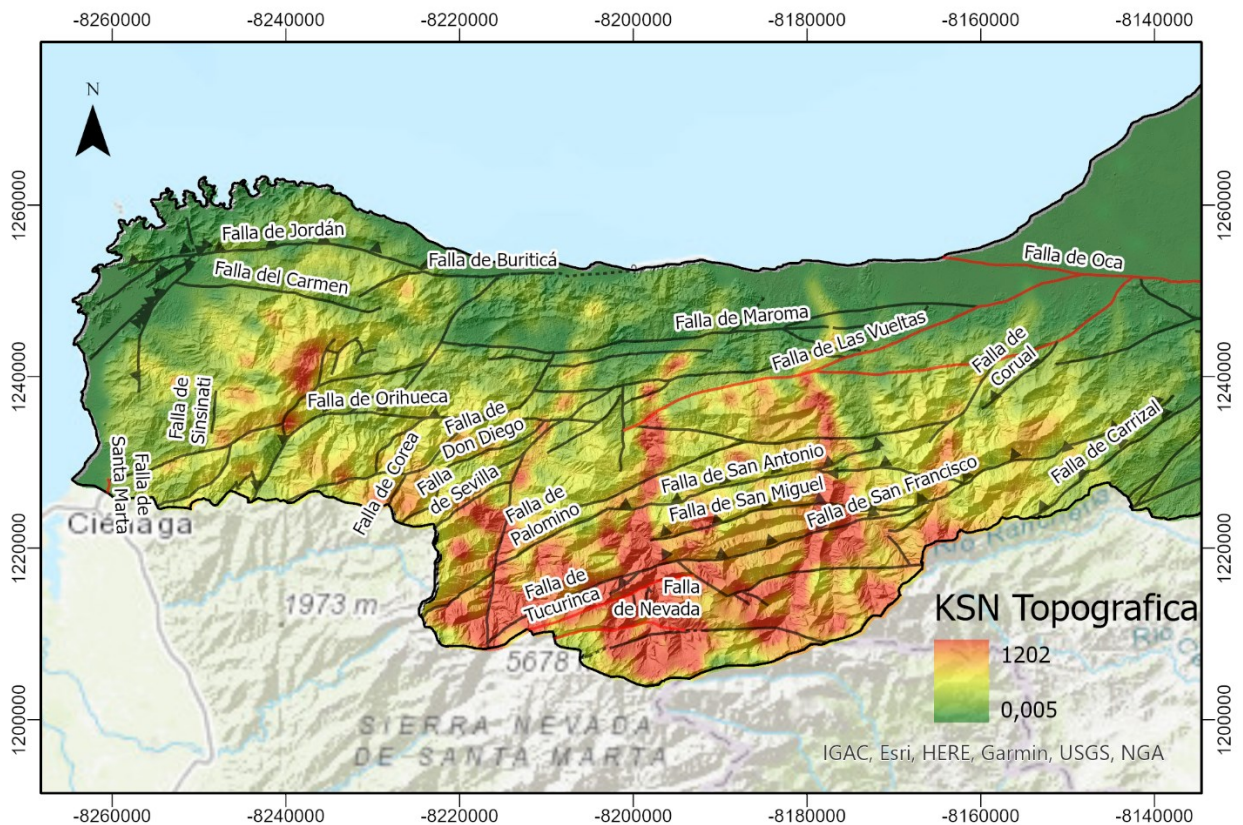


Figura 13. Mapa de Índice de KSN Topográfico (Elaboración propia).

En la figura 14 se observa el ráster del KSN obtenido a partir de una interpolación y toma valores desde 0.005 hasta 1.202. los valores más bajos se encuentran al norte de la zona con mayor cercanía a la costa y cerca de los alrededores donde los drenajes se encuentran próximos a su lugar de desembocadura al mar Caribe.

Los valores altos se encuentran concentrados principalmente hacia la parte central demarcados con color rojo, sin embargo, se observa con una orientación general a nivel NS, sobre los ríos Palomino, Don Diego y Buriticá. y los valores intermedios se ubican bordeando a estos valores altos, los cuales no presentan estructuras asociadas y cortan transversalmente en su mayoría a las fallas de la zona de estudio.

En el sector occidental se observa el patrón de valores altos con una orientación más NW, se ubica sobre el costado oriental de la cuchilla de san lorenzo y esta se ve afectada por la falla de Orihueca.

7.2. Análisis Morfoestructural

7.2.1. Análisis de drenajes

En el flanco norte de la SNSM se identifica en la red hídrica diferentes patrones de drenaje, donde predominan principalmente los drenajes paralelos, subparalelos y rectangulares, relacionados al control estructural que ejercen las fallas, así como patrones dendríticos en un nivel general debido a la similitud entre las litologías en la zona de estudio.

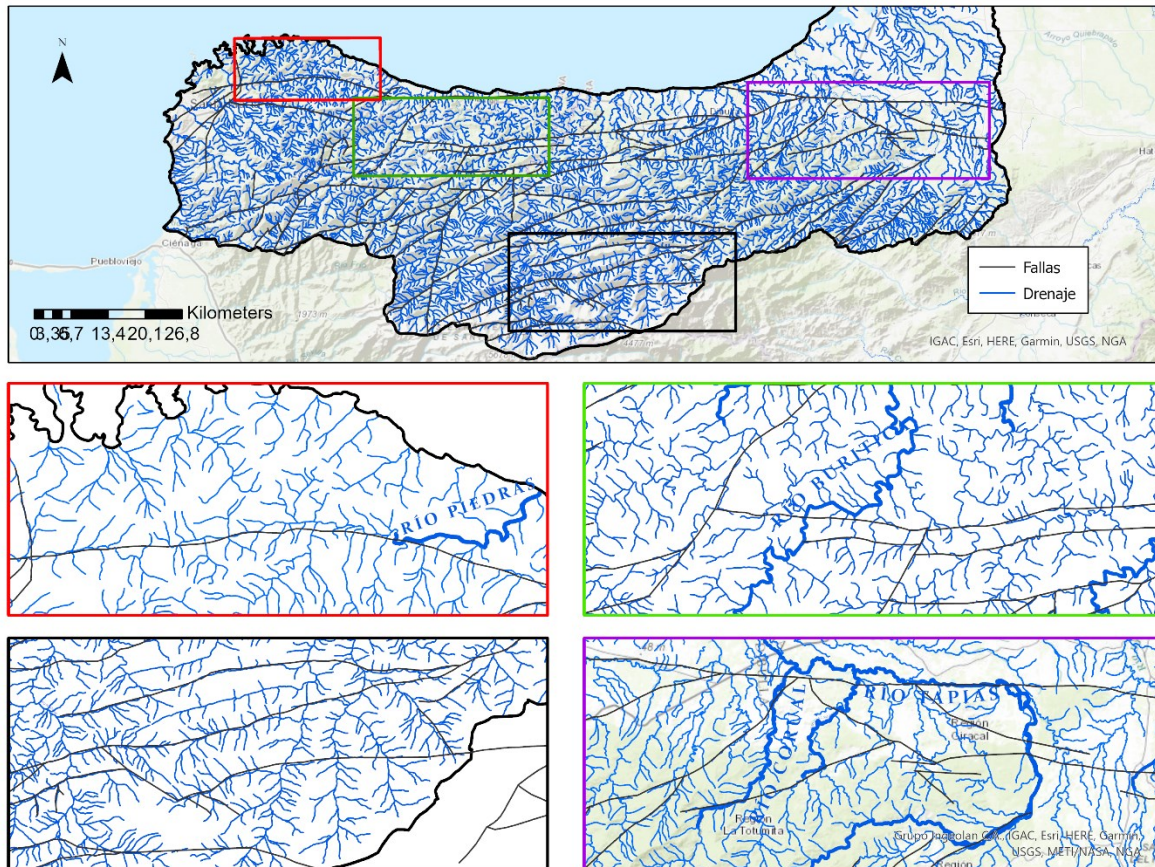


Figura 14. Variación en la red de drenaje en la zona de estudio (Elaboración propia).

Desde el occidente hacia el centro de la zona de estudio como se puede observar en la figura 15, en los recuadros de color rojo y verde, se evidencia sección proximal a la costa de los ríos Piedras y Buriticá. Respectivamente, se observan los drenajes subparalelos y rectangulares con una densidad baja a media, en su mayoría de corta longitud y usualmente conectan con el mayor caudal en forma obtusa, esto como resultado de la dirección preferencial de las rocas metamórficas y el control estructural asociado principalmente a la falla de Jordán y la falla de Maroma, sobre un relieve con pocos cambios de pendiente.

En la zona sur y central, en el recuadro negro de la figura 15, se observa el patrón de drenaje trellis o de rastrillo, sus tributarios son cortos y de alta densidad y se conectan al drenaje de las cuencas del río Don Diego, esta cuenca se encuentra bajo la influencia principalmente de la falla de San Francisco de naturaleza inversa.

Al oriente, en el recuadro morado de la figura 15, se observan los ríos Corual y Tapias, donde predominan patrones de drenajes sub paralelos y dendríticos, sus tributarios poseen una densidad media y se conectan de manera irregular a las corrientes principales, posee un cambio de pendiente constante y es típico de rocas fuertes y homogéneas, como rocas metamórficas e ígneas en ambientes húmedos tropicales.

7.2.2. Análisis de geoformas

Debido a la influencia tectónica que tiene en el terreno los sistemas de fallas y la expresión que resulta en la topografía por la afectación de estos esfuerzos, se encontraron marcadores lineales de tectónica activa, los cuales se muestran en la figura 16, se realizó una delimitación de las geoformas asociadas a este tipo de estilo estructural. El criterio usado para la elección de las mismas, fue sus expresiones topográficas, afectación a la red hídrica y su textura.

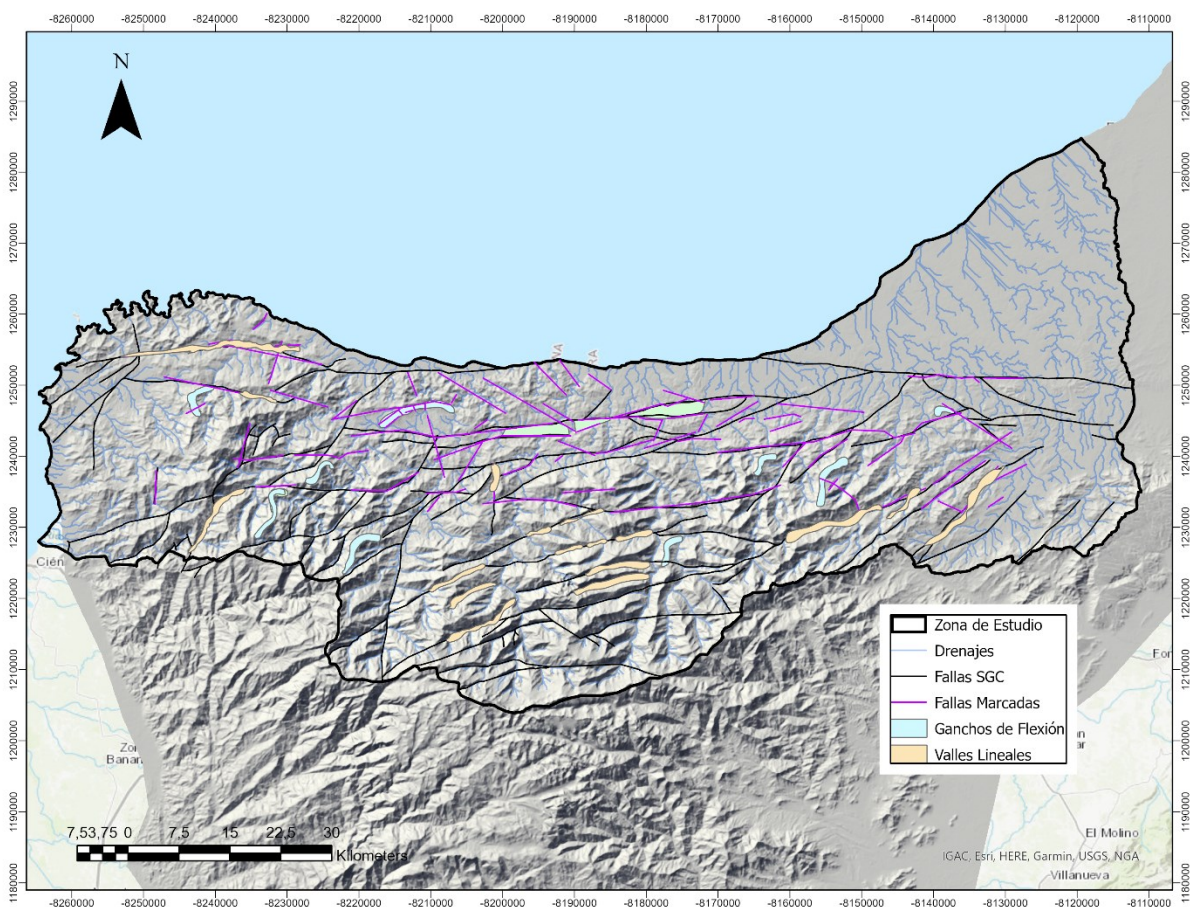


Figura 15. Mapa de Geoformas (Elaboración propia).

Entre las evidencias morfoestructurales encontradas a lo largo de la zona de estudio, se evidencian principalmente ganchos de flexión, lomos de presión, lagunas de falla y valles lineales. En la zona norte, la cual posee mayor cercanía a la costa, se observa dominancia de geoformas asociadas a un ambiente transcurrente debido a que se observa un control estructural muy fuerte sobre los drenajes. Adicionalmente, se observan lagunas de falla, lomos de presión y ganchos de flexión entre la falla de las Vueltas y Maroma, y estas estructuras conservan el rumbo EW de las fallas mencionadas y se observan con mayor claridad en la sección occidental el control que ejerce la falla de Jordán y su ramificación en cola de caballo sobre la topografía al indicar ganchos de flexión muy bien demarcados.

Hacia la zona sur de la zona de estudio se encontraron valles lineales en una alta concentración, con una orientación NE-SW, estos rasgos se encuentran asociados a la alta cantidad de fallas de carácter inverso que se encuentran en esta zona.

8. DISCUSIÓN

8.1. Actividad tectónica

A partir de los índices morfotectónicos aplicados en este proyecto, se evidencia una tectónica activa en el flanco norte de la SNSM, donde la mayor actividad tectónica y los levantamientos más recientes se concentran cerca de la costa a lo largo de las fallas de Oca, Buriticá, Jordán y el Carmen en la parte central y occidental de la zona de estudio. Esto respaldado en los patrones y correlaciones vistas en los diferentes índices calculados, los cuales han sido aplicados en diversos trabajos para determinar zonas con actividad tectónica (El Hamdouni et al., 2008; Ruszkiczay-Rüdiger et al., 2009; Pérez-Peña et al., 2010; Matos et al., 2016; García Delgado and Velandia, 2020).

En el flanco norte de la SNSM se diferenciaron 3 zonas evidenciadas por diferencias en los valores de los índices morfotectónicos y las características geomorfológicas, litológicas y estructurales. La zona occidental limitada por la línea de costa y la falla de Orihueca, la zona central limitada por la falla de Sevilla y la falla de San Francisco al oriente y la zona oriental que va desde la falla de San Francisco hasta la baja Guajira (Figura 17).

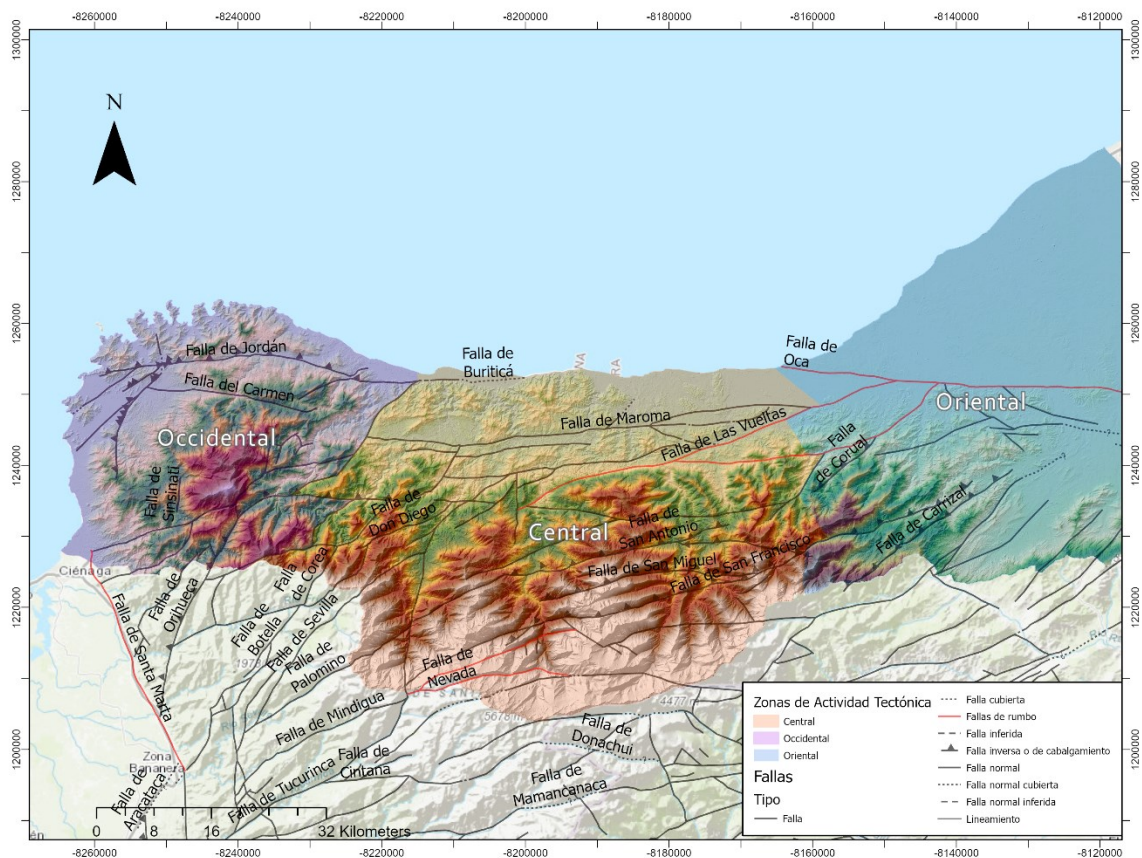


Figura 16. Mapa de división de las tres zonas definidas en el flanco norte de la SNSM

La zona occidental posee unos valores de Hi, Rr, Sv, Sm, (Figura 10.A) elevados asociados a geofformas como un filo estructural llamado la cuchilla de san lorenzo, y lineamientos de altos estructurales en sentido NE, así como ganchos de flexión (Figura 16) con terminación NE–WE. Estos lineamientos preservan la orientación de las fallas de Orihueca y Sinsinati. Los valores de menor magnitud se encuentran asociados principalmente a bajos topográficos, cañones y trazos de fallas (específicamente en la falla de Jordán y del Carmen), donde los procesos erosivos son dominantes como lo indica el KSN (Figura 13 y 14).

En la zona central se observó una distribución espacial de valores altos en los índices Hi, Rr, Sv y Sm (Figura 10), por lo que se dividió en dos secciones, la sección costera y la sección sur (Figura 17). En la sección próxima a la costa, se evidencia un patrón de altos valores en dirección E-W, que demarca el control estructural de las fallas de Oca, Buriticá, Maroma y las Vueltas sobre la red hídrica y la topografía. Adicionalmente, en esta zona se encuentra la mayor cantidad de cuencas elongadas (Figura 11) y las cuencas con mayor asimetría (Figura 12) lo que sugiere actividad tectónica alta para esta sección (Whipple et al, 2013).

En la sección sur de la zona central, se observa una concentración de valores altos en los índices Hi, Rr, Sv y Sm (Figura 10) con una tendencia NE-SW, asociados a las fallas de San Antonio, San Miguel, San Francisco y Nevada. Además, el KSN (Figura 13 y 14) presenta valores altos e intermedios en sentido N-S relacionados al cauce de los ríos Palomino, Buriticá y Don Diego. Esta relación entre los valores altos de KSN y la traza de estos ríos podría estar asociada a trazas de falla dirección N-S similares a la falla Sevillita que no se encuentran registradas en la cartografía.

En la zona oriental los índices calculados en el análisis topográfico (Figura 10) y el KSN (Figura 13 y 14), muestran valores intermedios y bajos en una tendencia dominante en sentido NE-SW asociado a la falla de las Vueltas, Carrizal y Corual, donde estas contrastan el cambio entre el frente de montaña de esta zona de la SNSM y el inicio de la depresión de la baja Guajira. Los valores de baja magnitud se establecen con un patrón de orientación E-W asociados a la falla de Oca. Adicionalmente, el Bs (Figura 11) y Af (Figura 12), muestran las cuencas de forma circular y alta asimetrías basculadas en sentido NE, que sugieren una actividad tectónica baja para esta sección (Whipple et al, 2013).

8.2. Estilo estructural

De acuerdo con Colmenares et al (2007), la SNSM se encuentra dividida en 6 regiones estructurales (Figura 17). Según este modelo, la zona de estudio se encuentra en las regiones estructurales I y II, las cuales se caracterizan por estructuras de rumbo dextrales EW y terminaciones compresivas con dirección al NE en el occidente.

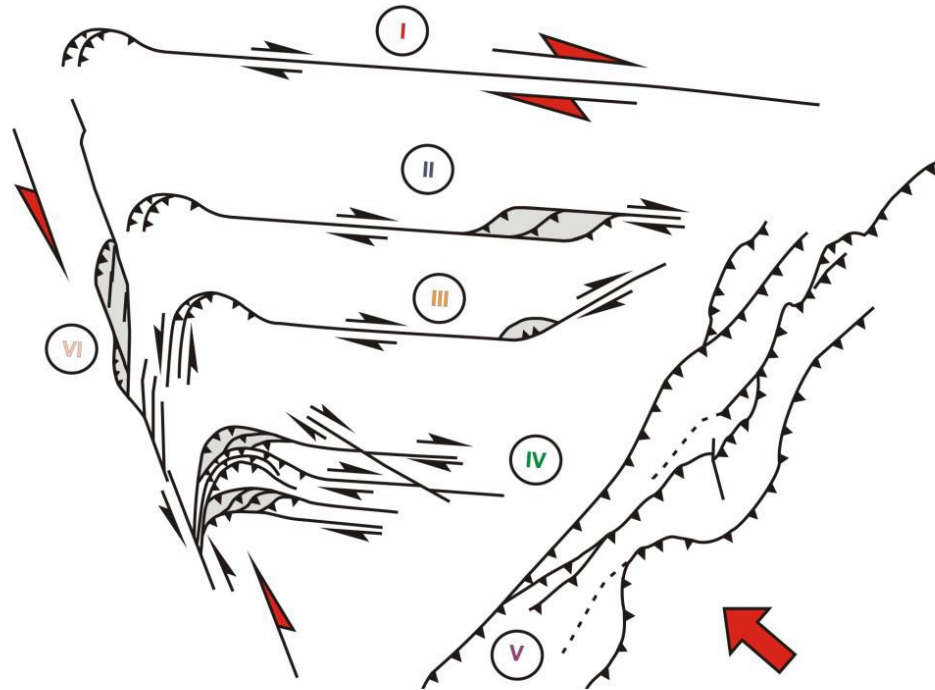


Figura 17 Mapa estructural de las regiones estructurales definidas a partir de características geométricas y cinemáticas propias (tomado de Colmenares et al, 2007).

En la zona occidental en su sección más cercana a la ciudad de Santa Marta, las estructuras se encuentran asociadas a un régimen de cabalgamiento en la terminación de las fallas Jordán y Buritaca las cuales poseen un rumbo E-W y al llegar a este lugar toman una dirección NE-SW, estas afloran como trazos curvados subparalelos entre si evidenciados en las fallas de Taganga y Florín, mostrando una clara expresión geomorfológica la cual se ve reflejada en los valles lineales y ganchos de flexión (Figura 16). Estos rasgos mencionados anteriormente se pueden relacionar con el modelo propuesto por Colmenares et al (2007), el cual sugiere que estas fallas de rumbo finalizan en una cola de caballo con una cinemática inversa de bajo ángulo en dirección NE-SE.

En la zona central es donde mejor se representan los dos estilos estructurales imperantes en la zona de estudio (Colmenares et al,2007). En la sección más cercana a la costa, las estructuras se expresan en una traza rectilínea en dirección E-W con una cinemática de rumbo dextral sobre las fallas de Buritaca y Maroma. Además, se identificaron marcadores lineales de tectónica de un régimen transcurrente como ganchos de flexión, lomos de presión, lagunas de falla (Figura 16) y drenajes deflectados en los afluentes del río Buritaca (Figura 15).

Por otra parte, en la sección sur de la zona central se encontró que predomina un régimen de cabalgamiento relacionado con las fallas de San Antonio, San Francisco y San Miguel, las cuales se observan subparalelas entre sí con una orientación NE-SW, y poseen una expresión morfológica bien marcada, definida a partir de la alta densidad de valles lineales observados (Figura 16) que conservan esta dirección. Además, estas estructuras generan un control estructural en la red hídrica evidenciado en un patrón de drenaje rastrillo sobre los tributarios del río Dibulla. A pesar que esta sección concuerda geográficamente con la zona estructural II del modelo propuesto por Colmenares et al (2007), los resultados encontrados en este estudio evidencian un control tectónico dominado por el régimen de cabalgamiento más que uno de rumbo.

En la zona oriental se observa un régimen transcurrente de rumbo dextral, asociado a la falla de Oca con una orientación E-W y la falla las Vueltas que se desprende desde Oca en sentido NE-SW. Estas estructuras afloran como trazos rectilíneos y se evidencia una expresión morfológica muy marcada, reflejada en los valles lineales estrechos y lineamientos topográficos (Figura 16) con un sentido E-W. Además, este control estructural se refleja en la red hídrica sobre los principales afluentes de la zona como lo son el río Tapias y el Corual (Figura 15). Estas características concuerdan con el modelo propuesto por Colmenares et al (2007) en el cual sugieren que en este sector de la SNSM hay una dominancia de un régimen transcurrente dextral.

8.3. Riesgo sísmico

La configuración tectónica de la parte noroccidental del Caribe Colombiano se encuentra asociada a la convergencia oblicua de la placa Caribe y la placa Suramericana (Taboada, 2000). Específicamente en el flanco norte de la SNSM, este límite de placas se encuentra definido por la Falla de Oca (Audemard, 2002).

La información sísmica y la actividad tectónica de la falla de Oca es muy poca, sin embargo, autores como Soulas & Agarwall (1982) estimaron una tasa de movimiento de 5 mm/año. Además, en torno a esta falla se han presentado focos sísmicos datados desde 1993 por el Servicio Geológico Colombiano, con magnitudes variables entre 1.5 y 6.2 en escala de Richter y una profundidad promedio entre 0 y 30 Km (SGC, 2017).

A esta falla se le atribuye el sismo que afectó a la ciudad de Santa Marta en 1834, el cual tuvo efectos devastadores en la infraestructura de la ciudad en aquel entonces (Bermúdez, 1997; Vilorio de la Hoz, 2000), este sismo sirve de referencia para sugerir el alcance de la amenaza sísmica que puede representar la falla de Oca, puesto que se considera que esta falla representa el 70% de la amenaza sísmica para la ciudad (AIS – INGEOMINAS, 1996).

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren una relación entre la actividad tectónica alta y el sistema de fallas de Oca en la parte occidental de la zona de estudio. A pesar de que este patrón no es consistente a lo largo de toda la traza de las fallas de Oca, otros autores (Audemard, 2000 y 2002; Montes, 2010; Chicangana et al, 2011) sugieren que este sistema de fallas presenta una actividad tectónica reciente y es considerada como una estructura con alto potencial sismogénico.

Al estar la capital del Magdalena ubicada sobre trazos de fallas activas sobre un margen transpresivo, es importante replantear el riesgo sísmico bajo lineamientos como los propuestos por Audemard (2000) para tener un mejor panorama de la verdadera peligrosidad sísmica que representan estas fallas para la población que habita en el perímetro urbano. Además, ante un inminente sismo no solamente es el riesgo estaría dado por otros fenómenos como deslizamientos, inundaciones y tsunamis como consecuencia de movimientos telúricos asociados a la falla de Oca y sus fallas satélites.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir análisis morfotectónico del flanco norte de la SNSM, se definieron dos estilos estructurales predominantes. El primero ubicado hacía la parte más costera, que refleja un estilo transcurrente con estructuras en dirección E-W con una cinemática dextral, asociado a la falla de Oca y sus fallas satélites. Por otra parte, un dominio de cabalgamiento, el cual ejerce mayor presencia en la parte central de la zona de estudio, y se encuentra demarcado por los lineamientos con un rumbo dominante en sentido NE-SW.

De acuerdo a las características morfoestructurales se dividió la zona de estudio en 3 zonas; la zona occidental, central y oriental. En la zona central los resultados muestran una tectónica activa evidenciada en las anomalías detectadas en los índices morfotectónicos, los cuales muestran patrones paralelos a los sistemas de fallas dentro de la zona de estudio. Por otra parte, en las zonas occidental y oriental si bien los índices presentan valores bajos e intermedios, no se puede descartar una actividad tectónica activa puesto que se observan algunas geoformas asociadas a una actividad tectónica relevante.

Las geoformas encontradas a lo largo de la zona de estudio también soportan la hipótesis de que la zona de estudio se encuentra bajo tectónica activa, puesto que se ven expresiones geomorfológicas marcadas, como ganchos de flexión, valles lineales, drenajes deflectados, cuencas elongadas y medianamente asimétricas, que son indicativas de actividad tectónica reciente.

Los índices morfotectónicos usados en este proyecto, prueban que este tipo de análisis brinda una vista general de la tectónica activa de una zona con difícil acceso, lo que provee una herramienta muy útil para el estudio de áreas de gran escala, con el fin de ubicar zonas que poseen preliminares con una tectónica activa que posteriormente para realizar una comprobación en campo de estructuras activas y desarrollar estudios especializados para tener un conocimiento más detallado de la actividad tectónica dentro de sectores específicos ya sea para el desarrollo de un plan de ordenamiento territorial, planeación de infraestructura vial, urbana o industrial, además del desarrollo y construcción de viaductos.

Como la metodología aplicada es indirecta, los resultados de este estudio son preliminares y deben ser soportados y validados con estudios especializados, además, que se parte del supuesto que las expresiones morfológicas están asociadas a la tectónica por lo que es necesario estudios de campo que permitan excluir algún predominio litológico o climático en los resultados obtenidos.

La evaluación de la amenaza sísmica en Colombia es muy limitada, es por esto que estudios neotectónicos como el realizado en el presente proyecto, son importantes, debido a que sirven de base para la actualización del mapa de amenaza sísmica para implementar medidas de prevención y establecer zonas con un inminente riesgo sísmico.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Audemard F. (1995). Paleoseismicity studies on the Oca-Ancón Fault system, northwestern Venezuela. Caracas: ELSEVIER.
- AUDEMARD, F. A. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Venezuela and its Offshore Regions. USGS.
- Audemard, F. E., Y Audemard, F. A. (2002). Structure of the Mérida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics* Volumen 345 Issues 1–4, Páginas 1-26 Consultado el 10 de septiembre de 2018, de [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00218-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00218-9)
- Bermudez M., B. . (2013). Strong Tectonic and weak Climatic Control on Exhumation rates in the Venezuela Andes. *Lithosphere* v5.Nº1., 3-16.
- Bermúdez, Arturo E., (1997). Materiales para la historia de Santa Marta. Recopilación histórica. Editorial Kempires.
- Bull, W. (2007). Tectonic Geomorphology of mountains: A new approach to paleoseismology. *Malden MA*.
- Cardona, A., Valencia, V. A., Bayona, G., Duque, J., Ducea, M., Gehrels, G., ... Ruiz, J. (2010). Early-subduction-related orogeny in the northern Andes: Turonian to Eocene magmatic and provenance record in the Santa Marta Massif and Rancheria Basin, northern Colombia. *Terra Nova*. 1-9. Consultado el 25 de julio de 2018, de <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2010.00979.x>
- Cediel, F., Shaw, R. P., Y Cáceres, C. (2003). Tectonic Assembly of the Northern Andean Block. The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics: AAPG Memoir 79, p. 815-848. Consultado el 25 de julio de 2018, de <https://doi.org/10.1306/M79877C37>
- Chicangana G, Kammer A, Vargas C, Ordoñez Aristizabal C, Mora - Páez H, Ferrari A, López S. (2011). El posible origen de la sismicidad somera que se presenta en la región que corresponde a la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía de Perijá y la Península de La Guajira, noreste de Colombia. *Cap Y Cua*.
- Colmenares, F. H., Ana, B., Mesa, M., Jairo, R., Roncancio, H., Edgar, G. (2007). Geología de las planchas 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 27, 33 y 34. Evolución Geohistórica de la Sierra Nevada de Santa Marta. Geología de las planchas. Volumen 12. Consultado el 22 de julio de 2018, de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010018162/documento/pdf/2105181621101000.pdf>
- Cortes, E., 2013. Análisis Petrogenético de las denominadas “Anortositas” aflorantes en la vertiente occidental de La Sierra Nevada de Santa Marta – Sector Rio Sevilla, El Palmor, (Colombia). Tesis de maestría en ciencias de la geología, Universidad nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Daxberger, H. R. (2015). Analysis of geomorphic indices in the southern Central Andes (23°-28°S). Evidence for pervasive Quaternary recent deformation in the Puna Plateau. *Geomorphology*, 57-76.

- Demoulin, A. (2011). Basin and river profile morphometry. A new index with a high potential for relative dating of tectonic uplift. *Geomorphology*, 97-107.
- Freymueller, J. T. (1993). Plate Motions in the north Andean Region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Figueroa, A. M. (2010). Tectonic geomorphology of the southern Sierra Nevada Mountains (California). Evidence for uplift and basin formation. *Geomorphology*, 34-45.
- Gaspari, F., Rodríguez Vagaría, A., Senisterra, G., Denegri, G. A., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Augm Domus*, 4.
- Hack, J. (1973). Stream-Profile analysis and stream gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey*, 421- 429.
- Hare, P. G. (1985). Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya peninsula, Costa Rica. *Binghamton symposia in Geomorphology: International Series 15*, 75 - 104.
- Keller, e. a. (2002). *Active Tectonics. Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Toronto: Prentice Hall.
- Matoš, B., Pérez-Peña, J.V., Tomljenović, B., 2016. Landscape response to recent tectonic deformation in the SW Pannonian Basin: evidence from DEM-based morphometric analysis of the Bilogora Mt. area, NE Croatia. *Geomorphology* 263, 132–155
- Montes, C, Bayona, G., Jaramillo, C., Ojeda, C., Molina, M., & Herrera, F. (2005). Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar- Rancheria valley: Rigid-beam pivot model, 520–523. 6th International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG 2005, Barcelona), Extended Abstracts: Páginas 520-523. Consultado el 5 de septiembre de 2018, de http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-03/010040292.pdf
- Montes, Camilo, Guzman, G., Bayona, G., Cardona, A., Valencia, V., & Jaramillo, C. (2010). Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería basins. *Journal of South American Earth Sciences*, Volumen 29, Issue 4, Páginas 832–848. Consultado el 2 de septiembre de 2018, de <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.010>
- Mora, A., Parra, M., Forero, G.R., Blanco, V., Moreno, N., Caballero, V., Stockli, D., Duddu, I., Ghorbal, B., 2015. What drives orogenic asymmetry in the Northern Andes?: a case study from the apex of the northern andean orocline. *Mem. 108 Pet. Geol. Potential Colomb. Caribb. Margin*, 547–586, <http://dx.doi.org/10.1306/13531949M1083652>. Morales, L., Ruiz, O., Niño,
- Panizza, M. (1996). Developments in earth surface processes. *Environmental Geomorphology. Elsevier*.
- Pavrides, S. (1989). LOOKING FOR A DEFINITION OF NEOTECTONICS. *Terra Nova*, 233–235.
- Pérez-Peña, J.V., Azor, A., Azañón, J.M., Keller, E.A., 2010. Active tectonics in the Sierra Nevada (betic Cordillera, SE Spain): insights from geomorphic indexes and drainage

- Ramírez-Herrera, M. (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the acambay graben, Mexican volcanic belt. *Earth Surface Processes and Landforms*, 317-322.
- Ruszkiczay-Rüdiger, Z. (2009). Discrimination of fluvial, eolian and neotectonic features in a low hilly landscape: A DEM based morphotectonic analysis in the central pannonian basin, Hungary. *Geomorphology*, 203 - 217.
- Scheidegger, A. E. (2004). *Morphotectonics*. Vienna: Springer.
- Shahzad, F. &. (2011). TecDEM: A MATLAB based toolbox for tectonic geomorphology. *Computers & Geosciences*.
- Strahler. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin* 63, 1117-1142.
- Tadono, H. I. (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry*, 71-76.
- Tschanz et al. (1969). Geology Of The Sierra Nevada De Santa Marta Area (Colombia). Santa Marta: Ministerio de Minas y Energía.
- Tschanz et al. (1974). Geologic Evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. *Geological Society of America Bulletin*, 273-284.
- Usta, S. G. (2015). Morphometric analysis of active tectonic imprints at the junction of Buyuk Menderes and Bozdogan grabens, western Anatolia. Middle East Technical University, Ankara - Turquía.
- Whipple, K.X., DiBiase, R.A., Crosby, B.T., 2013. Bedrock rivers. In: Shorder, J. (Editor in Chief), Wohl, E. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, CA, vol. 9, Fluvial Geomorphology, pp. 550 – 573.