



UNIVERSIDAD REGIONAL AMAZÓNICA IKIAM
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y AGUA
CARRERA DE GEOCIENCIAS

**Análisis de índices geomorfológicos para
la caracterización de la actividad
neotectónica de la falla Tena en el
pedemonte amazónico**

Proyecto de investigación previo a la obtención del Título de:
INGENIERA EN GEOCIENCIAS

AUTORA: CINTHIA BELÉN BENITES BAILÓN
TUTOR: PhD. OSWALDO JOSÉ GUZMÁN GUTIÉRREZ

Napo-Ecuador.
2023

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD

Tena, 5 de febrero de 2023

Yo, Cinthia Belén Benites Bailón con documento de identidad N° 2450291667, declaro que los resultados obtenidos en la investigación que presento en este documento final, previo a la obtención del título Ingeniero/a en Geociencias son absolutamente inéditos, originales, auténticos y personales.

En virtud de lo cual, el contenido, criterios, opiniones, resultados, análisis, interpretaciones, conclusiones, recomendaciones y todos los demás aspectos vertidos en la presente investigación son de mi autoría y de mi absoluta responsabilidad.

Por la favorable atención a la presente, suscribo de usted,

Atentamente,



Cinthia Belén Benites Bailón
C.I. 2450291667

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Cinthia Belén Benites Bailón, con documento de identidad N° 2450291667, en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación: Análisis de índices geomorfológicos para la caracterización de la actividad neotectónica de la falla Tena en el piedemonte amazónico de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ÒRGANICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN, reconozco a favor de la Universidad Regional Amazónica Ikiám una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Así mismo autorizo a la Universidad Regional Amazónica Ikiám para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación superior.

Tena, 5 de febrero de 2023



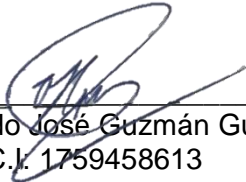
Cinthia Belén Benites Bailón
C.I. 2450291667

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Certifico que el trabajo de integración curricular titulado: **“Análisis de índices geomorfológicos para la caracterización de la actividad neotectónica de la falla Tena en el piedemonte amazónico”**, en la modalidad de: proyecto de investigación en formato artículo original, fue realizado por: Cinthia Belén Benites Bailón, bajo mi dirección.

El mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad Regional Amazónica Ikiám, para su entrega y defensa.

Tena, 5 de febrero de 2023



Oswaldo José Guzmán Gutiérrez
C.I. 1759458613

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi familia y amigos aquellos que me apoyaron siendo mi soporte en momentos delicados de mi vida. En especial a mi amada madre, todos mis triunfos son para ti, gracias, por tanto.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera extender un cálido agradecimiento a mi familia, mis hermanas, hermano y sobrinas por brindarme apoyo durante mi vida universitaria. En especial a Doménica Yépez por ser incondicional en el transcurso de mi etapa de culminación de tesis.

A mis amigos Bryan, Steven, Sol, Vivi, Andrea, David, Daniela, Fernanda, Deniss por ser un soporte emocional durante una época fuerte de mi vida. Y a Carolina por ser un apoyo durante todo el proceso de mi tesis.

A mis profesores en Ikiam Moisés Gualapuro, Amanda Cevallos y José Serrano por enseñarme con tanto amor y paciencia sobre distintas ramas de la ciencia y sobretodo enseñarme que además de ser excelentes profesionales se puede ser buenas personas capaces de ayudar a quienes lo necesitan.

Al grupo de investigación de Ciencias de la Tierra y Clima de la Universidad Regional Amazónica Ikiam y al proyecto CTC-006-2020: “*IGCP 669- Identification of seismogenic faults in populated areas of Latin America and its incorporation into seismic hazard assessment*” de donde fue realizado este proyecto de titulación. Un especial agradecimiento a mi tutor Oswaldo Guzmán por guiarme a través del conocimiento de la tectónica activa con mucha paciencia y brindarme de su tiempo para solventar mis dudas.

TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE DERECHO DE AUTOR, AUTENTICIDAD Y RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
MARCO GEOLÓGICO, GEODINÁMICO Y GEOMORFOLÓGICO	3
Factores geológicos	3
Factores geodinámicos	4
Factores geomorfológicos	4
METODOLOGÍA	6
Cartografía de la falla Tena	7
Extracción de la red de drenaje	7
Subcuencas hidrográficas atravesadas por la falla	8
Cálculo de índices geomorfológicos	8
<i>Sinuosidad de frente de montaña (smf)</i>	8
<i>Asimetría de cuenca de drenaje (AF)</i>	9
<i>Radio de elongación (Re)-formas de cuenca</i>	9
<i>Índice de Hack (índice de gradiente-metro)</i>	9
RESULTADOS	11
Traza de la falla, extracción de drenajes, delimitación de cuencas	11
Asimetría de cuenca de drenaje (AF)	12
Sinuosidad de frente de montaña (Smf)	14
Índice de forma de la cuenca (Re)	15
Índice de Hack (SL)	16
DISCUSIÓN	18
CONCLUSIONES	21
REFERENCIAS	22

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información geográfica utilizada en el estudio.....	6
Tabla 2. Resultados índices de asimetría (AF) e índice normalizado en su valor absoluto menos 50 en las 6 subcuencas del área de estudio.....	12
Tabla 3. Resultados aplicación de sinuosidad de frente de montaña para las 6 subcuencas del área de estudio.....	14
Tabla 4. Radios de elongación para las 6 subcuencas del área de estudio	15

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio y de la falla Tena cartografiada por el proyecto SARA.....	3
Figura 2. Geología de la zona de estudio. Modificado de Mapa geológico de la república del Ecuador.	4
Figura 3. Geomorfología del área que atraviesa la falla Tena. Modificado de SiG-Tierras.....	5
Figura 4. Diagrama esquemático de la metodología con cada fase utilizada para generar las capas.....	7
Figura 5. Modelo de trabajo para la extracción de la red de drenaje.	8
Figura 6. Modelo de trabajo para delimitar cuencas hidrográficas en el análisis espacial.	8
Figura 7. Modelo de trabajo para calcular el índice de Hack (SL) y obtener los puntos anómalos (knickpoints).....	10
Figura 8. Mapa de evidencias geomorfológicas (drenajes desplazados y facetas triangulares y trapezoidales).....	11
Figura 9. Delimitación de las subcuencas y regiones de drenaje. Falla Tena cartografiada con tendencia al NNE-SSO.	11
Figura 10. a) Mapa de densidad de los ríos principales, b) Mapa que muestra el factor de asimetría de las subcuencas y la dirección de inclinación relacionada con la tectónica activa relativa.	13
Figura 11. Ubicación espacial de los 10 tramos utilizados para el cálculo de la sinuosidad de frente de montaña en un mapa de pendientes del área de estudio.	15
Figura 12. Índice de circularidad de las subcuencas y cartografía de la falla Tena.....	16
Figura 13. Mapa de distribución SL, a) valores del índice de Hack y principales estructuras de la zona de estudio, b) puntos de anomalías superpuesta sobre un mapa de litología de la zona de estudio.	17

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es aplicar, por primera vez, índices geomorfológicos (sinuosidad de frente de montaña, índice de forma de cuenca, índice de Hack y factor de asimetría de cuenca de drenaje) para analizar la actividad tectónica del piedemonte amazónico en Ecuador. El análisis se realizó en un segmento de 21,51 km de la falla superficial Tena. En primer lugar, se cartografió detalladamente la traza de la falla a partir de evidencias geomorfológicas (drenaje rectilíneo, drenaje desplazado, facetas triangulares). Posteriormente, se calcularon los índices geomorfológicos en un entorno SIG. Los resultados cuantitativos obtenidos muestran que en la parte NNE existe una mayor deformación, lo que también es observable en el trayecto de la traza de falla con tendencia NNE-SSO de naturaleza transpresiva-inversa. Además, el área investigada está expuesta a una actividad tectónica de alta a moderada, que se destaca por la correlación entre los cuatro índices geomorfológicos calculados. Finalmente, los resultados obtenidos validan la utilidad de esta técnica para resaltar la actividad tectónica en el piedemonte amazónico de Ecuador, donde los procesos de meteorización tropical y la altacobertura vegetal complican el análisis cualitativo convencional.

Palabras clave: Índices geomorfológicos, tectónica activa, piedemonte amazónico, peligro sísmico, Ecuador

ABSTRACT

The aim of this work is to apply, for the first time, geomorphological index (mountain front sinuosity, basin shape index, Hack index and drainage basin asymmetry factor) to analyze the tectonic activity of the Amazonian foothills in Ecuador. The analysis was performed on a 21.51 km segment of the Tena surface fault. First of all, the trace of the fault was mapped in detail from morphotectonic evidence (displaced drainage, triangular facets). Subsequently, the geomorphological index were calculated in a GIS environment. The quantitative results obtained show that in the NNE part there is greater deformation, which is also observable in the path of the fault trace, with NNE-SSO orientation of type reverse-transpressive, furthermore the area investigated is exposed to high to moderate tectonic activity, which is highlighted by the correlation between the four calculated geomorphological index. Finally, the results obtained validate the usefulness of this technique to highlight tectonic activity in the Amazonian foothills of Ecuador, where tropical weathering processes and high vegetation cover complicate conventional qualitative analysis.

Keywords: Geomorphologic index, active tectonic, Amazon piedmont, seismic hazard, Ecuador

INTRODUCCIÓN

Ecuador es una de las regiones sudamericanas afectadas por una intensa actividad sísmica, causada principalmente por la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo la placa sudamericana a un ritmo de 58 ± 2 mm/año y en dirección E-W (Trenkamp et al., 2002). Debido a la génesis de la tectónica de placas el territorio ecuatoriano comprende tres grandes regiones: Costa, Zona Andina o Sierra, zona Subandina u Oriente (Marocco & Winter, 1997).

La zona Subandina ecuatoriana se caracteriza por una intensa actividad sísmica y volcánica, y por llamativos procesos de erosión (Baby et al., 2004) y la inversión tectónica de viejas fallas normales vinculadas a un sistema de rift de edad Triásico y/o Jurásico Inferior. Estas fallas, actualmente inversas y con buzamiento fuerte, están orientadas principalmente N-S o NNE-SSW (Baby et al., 1999; Baby et al., 2004). El subandino tiene 3 unidades morfotectónicas constituidas por el levantamiento del Napo, la Depresión de Pastaza y la Cordillera de Cutucú (Baby et al., 2004). La zona de levantamiento de Napo está formada por estructuras florales NNE-SSW con tendencia positiva que aún se encuentran sísmicamente activas (Jaillard et al., 2000).

El proyecto SARA (South America Risk Assessment) analizó la zona Subandina y aumentó el conocimiento sobre las fallas de América del Sur. Así que la representación de fallas peligrosas es muy heterogénea, y difiere por cobertura geográfica, disponibilidad y confiabilidad de los datos (Costa et al., 2020). Sin embargo, aún con una base de datos preexistente (Egüez et al., 2003), la representación cartográfica de las fallas esta subrepresentada por el conocimiento neotectónico regional actual. Es decir, transmiten diferencias en comparación con áreas específicas donde se ha llevado a cabo un mapeo neotectónico mucho más detallado.

La falla activa de Tena (Fig. 1) es una falla inversa que separa el subandino del piedemonte amazónico. La falla Tena tiene orientación N-S y una longitud de 35 km su último movimiento se postula en el Cuaternario (<1.6 Ma) y tiene una tasa de deslizamiento <1 mm/año (Egüez et al., 2003). La falla Tena deforma rocas sedimentarias marinas del Cenozoico y rocas graníticas del Jurásico que se superponen con abanicos aluviales del Terciario a lo largo de la zona Subandina (Baby et al., 2004).

La base de datos del proyecto SARA, describe a la falla Tena como una falla transcurrente-inversa perteneciente al Cuaternario con una edad <1.8 Ma y una longitud de 29.1 km, el resto de la información es desconocida. Se han registrado movimientos de magnitud Mw 6.4 en la falla Tena (Beauval et al., 2010). Adicionalmente, la proximidad de nodos sismogénicos en la falla Tena son capaces de generar movimientos telúricos (Chunga et al., 2010), pudiendo afectar poblaciones e infraestructura cercanas.

Las fallas inversas subandinas están relacionadas con los anticlinales del piedemonte. Su identificación en superficie es compleja debido a la vegetación alta en la zona tropical y las condiciones de trópico. Estas fallas se pueden identificar a través de la interpretación de evidencia geomorfológica como sistemas fluviales desplazados, facetas triangulares, crestas montañosas desplazadas. Lo cual se puede observar en imágenes satelitales y modelos digitales de terreno (DTM).

Una técnica aplicada recientemente por varios estudios tectónicos (Jaberi et al., 2018; Mahmood & Gloaguen, 2012; Molano Cárdenas & Torres Rodríguez, 2018; Toural Dapoza & Moreiras, 2017) es el uso de índices geomorfológicos para poder mapear y estudiar fallas activas. Es útil para identificar áreas que experimentan una rápida deformación tectónica y detectar anomalías producidas por actividades tectónicas como levantamientos o hundimientos del área (Hamdouni et al., 2008).

A pesar de que la falla Tena se ha determinado como una falla capaz de generar sismos con magnitudes mayores a 6 (Beauval et al., 2010) y ser una falla tectónicamente activa, investigaciones actuales de la falla tienen discrepancias en tanto a su geometría, cinemática e incluso su nomenclatura. Para este propósito se pretende cartografiar la falla Tena y evaluar la actividad tectónica de la falla a través de la cuantificación de índices geomorfológicos.

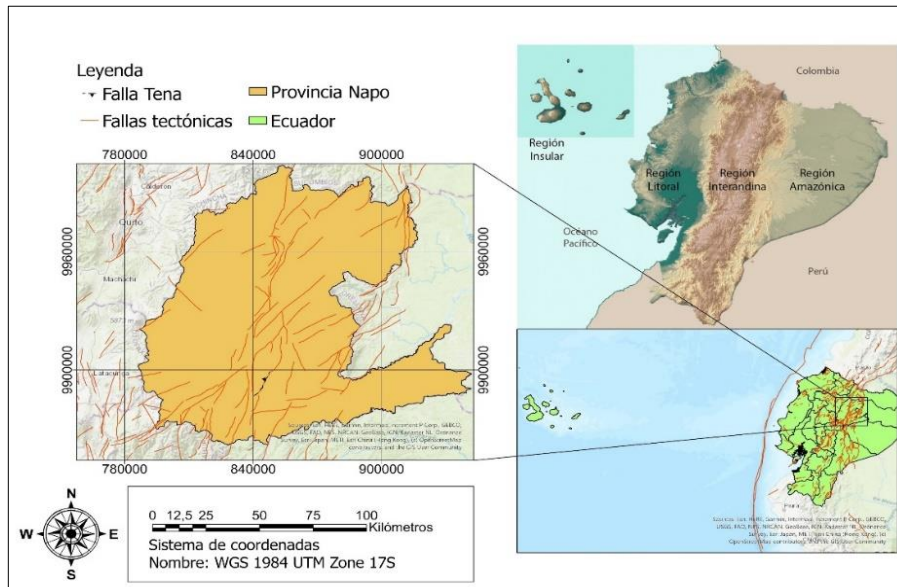


Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio y de la falla Tena cartografiada por el proyecto SARA.

Realizado por: Belén Benites, 2022

MARCO GEOLÓGICO, GEODINÁMICO Y GEOMORFOLÓGICO

Factores geológicos

De acuerdo con el mapa geológico de Egüez et al., (2017) la geología de la zona de estudio se compone de 2 zonas importantes que son atravesadas por la falla Tena, la zona Oeste está compuesta por rocas intrusivas de granito de Abitagua (G^{G3}). El Este se subdivide en 3 partes: al Noreste por la Formación Misahualli (J_M) de lavas y piroclastos con una edad de 201.3 Ma, en la zona central y sureste por la Formación Tiyuyacu (PcE_T) de conglomerados y areniscas del Eoceno con 56.0 Ma, seguida de la Formación Chalcana ($OMCh$) de lutitas y yeso formada hace 33.9 Ma en el Oligoceno, la Formación Chambira (MPL_{ch}) de areniscas, lutitas y tobas del Plioceno hace 5.3 Ma y la Formación Arajuno (M_A) de arcillas, areniscas, lignitos hace 23 Ma. En última instancia la Formación Tena (KPc_T) subyace el resto de formaciones, se compone por lutitas, capas rojas del cretácico pertenecientes al cretácico tardío hace 145 Ma y constituye la formación más antigua de la zona.

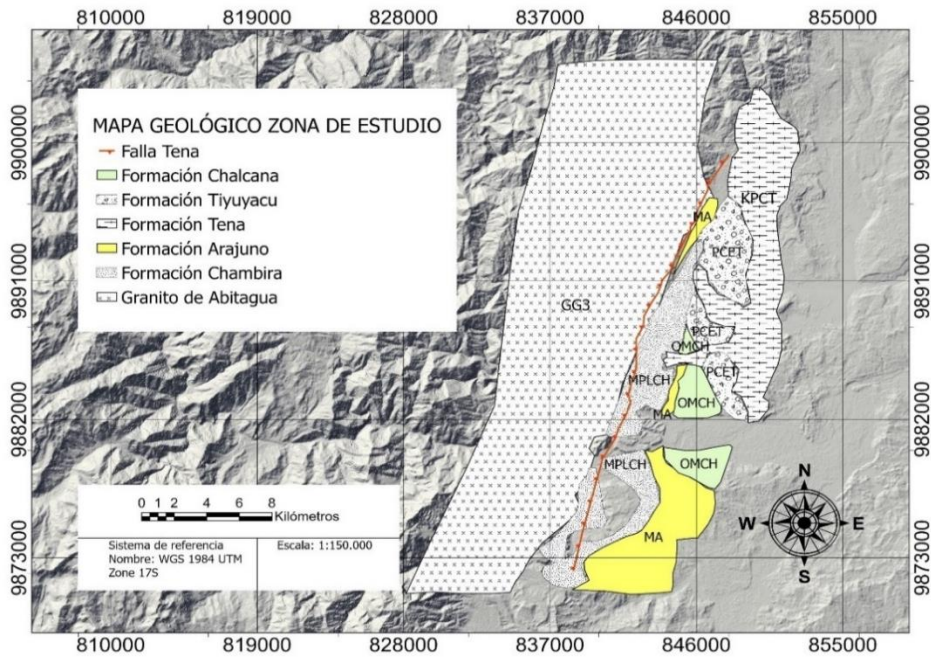


Figura 2. Geología de la zona de estudio. Modificado de Mapa geológico de la república del Ecuador.

Fuente: Egüez et al., 2017

Realizado por: Belén Benites, 2022

Factores geodinámicos

Existe una deposición de sedimentos Santiago, Hollin, Napo hasta la Formación Tena donde se inicia una inversión transpresión en el cretácico tardío (Baby et al., 1999; Baby et al., 2004), se deposita la Formación Tiyuyacu y se da la subsidencia debido al peso de los sedimentos depositados. Acto seguido se depositan las Formaciones Arajuno y Chambira. En el neógeno se da una inversión tectónica, el nacimiento de la Depresión Pastaza y de la cordillera Subandina (Almeida & Sourdat, 1983). El proceso de erosión reciente también se refleja en la morfología de la zona Subandina que está caracterizada por la presencia de terrazas aluviales y la formación de grandes deslizamientos (Baby et al., 2004). De acuerdo con Alvarado (2012) se conoce que la sismicidad asociada a la zona Subandina está relacionada con las fuentes sismogénicas de Napo y Cutucú.

Factores geomorfológicos

La zona Subandina corresponde a la parte más deformada del sistema de cuencas de antepaís y se considera como un “depósito de tope en cuña” (Baby et al., 2004) los volcanes más representativos en la zona Subandina: Reventador, Sumaco y Sangay son característicos de una zona de subducción (Barragan et al., 1998). Morfológicamente la zona Subandina se divide en 3 segmentos localizados de norte a sur: El levantamiento de Napo; la Depresión de Pastaza; la Cordillera del Cutucú (Baby et al., 2004).

El área que atraviesa la falla Tena cuenta con varios tipos de geformas según su génesis en su mayoría de tipo laderas al Oeste, aunque también es apreciable los tipos tectónico-erosivo y poligénicas. En la parte Este dominan geformas tipo tectónico erosivo, de laderas, fluviales y en menor medida están presentes las poligénicas y las estructurales (Fig. 3). Para la zona tectónica-erosivo, las geformas no están ligadas a un sustrato litológico concreto, son modeladas por la erosión y tienen una génesis tectónica. En cambio, las laderas están más ligadas a formas y depósitos relacionados con su propia evolución y dinámica (MAG-SIGTierras, 2014).

Según Bès de Berc et al., (2005) el sistema de drenaje de la zona Subandina se caracteriza por la evolución de Oeste a Este, desde muy inmaduro hasta maduro en la parte distal amazónica. La red de drenaje que atraviesa la falla Tena cuenta con la presencia de los ríos Tena, Colonso, Jatunyacu, entre otros y de las geformas con cuencas situadas en laderas del sur del levantamiento Napo.

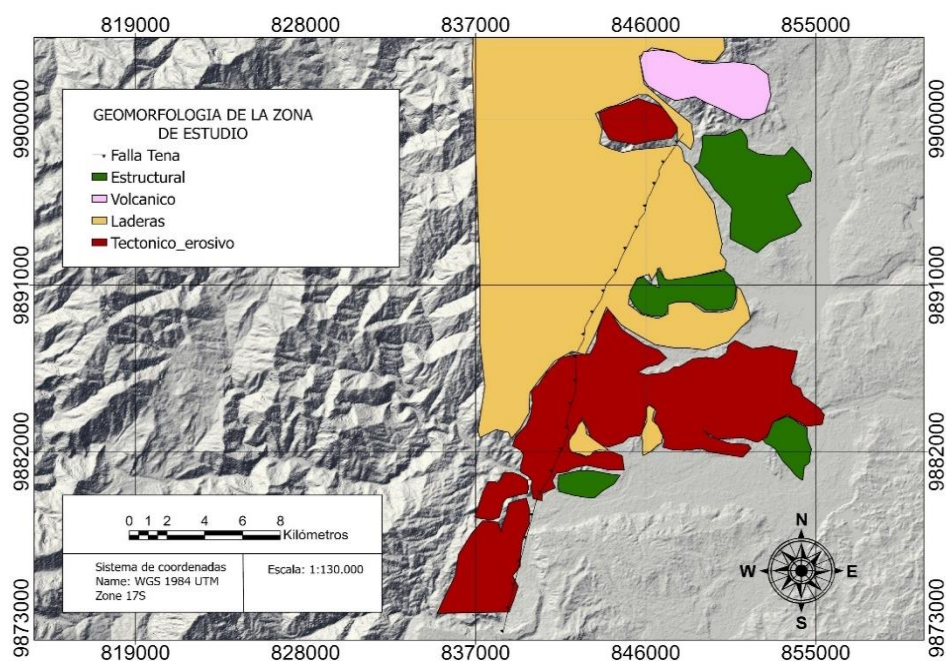


Figura 3. Geomorfología del área que atraviesa la falla Tena. Modificado de SiG-Tierras

Fuente: MAG-SIGTierras, 2022

Realizado por: Belén Benites, 2022

METODOLOGÍA

En el marco de esta investigación se cuantifica en ambiente SIG los índices geomorfológicos para evaluar la actividad tectónica de la falla Tena en la zona Subandina. Se cartografió la falla Tena y se aplicó un enfoque de análisis espacial en las subcuencas establecidas a partir de límites hidrográficos de sistema de información geográfica ArcGIS pro (Esri, 2020) donde se integró la información contenida en Tabla 1.

Tabla 1. Información geográfica utilizada en el estudio.

Información	Escala	Temporalidad	Fuentes
Imágenes satelitales de la zona de estudio en Google Earth	1:10000	2012	Google Earth 7.3.6.9277, 2012
Geopedología del cantón Tena	1:50000	2019	(MAG-SIGTierras, 2020)
Modelo digital de terreno (DTM)	1:250000	2010	ALOS PALSAR ASF (Alaska Satellite Facility) Hi-Res Terrain corrected de 12,5 m
Fallas tectónicas de América del sur	1:400000	2022	https://sara.openquake.org/hazard_rt2

Realizado por: Belén Benites, 2022

El diagrama de flujo de la metodología adoptada para cuantificar los índices geomorfológicos se ilustra en la Fig. 4

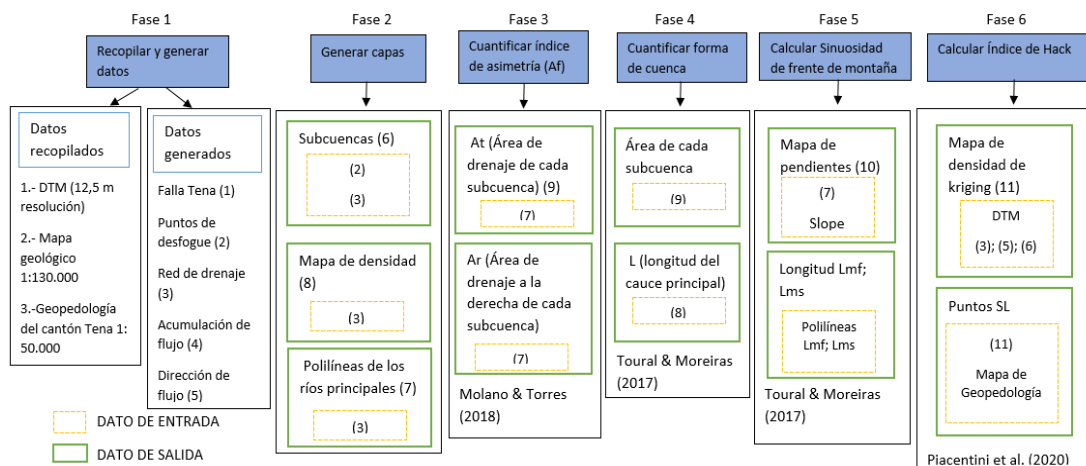


Figura 4. Diagrama esquemático de la metodología con cada fase utilizada para generar las capas.

Realizado por: Belén Benites, 2022

Cartografía de la falla Tena

Se consideró las evidencias geomorfológicas observables (Graveleau et al., 2015) con la vista desde el satélite de Google Earth en una escala de 10000 y el archivo DTM. A partir de identificar las evidencias geomorfológicas (sistemas fluviales desplazados y facetas triangulares) entre los ríos Tena, Pano y Jatunyacu se generó una traza coherente de 21,51 km de longitud con el fin de reconstituir la traza de la falla Tena.

Extracción de la red de drenaje

Se creó un *modelbuilder* para extraer la red de drenaje del archivo DTM, el uso de la herramienta *fill* que permitió rellenar información faltante en el DTM y *flow accumulation*, *flow direction* y *raster calculator* para identificar la red de drenaje. Se usó *conditional* con el fin de obtener la cantidad de ramificaciones, y con *stream link* se generó una continuidad entre las ramificaciones. Por último, se creó un raster con *streamorder* del orden de las corrientes, y finalmente se convirtió la capa raster a polígonos con *stream feature* (Gupta et al., 2022).

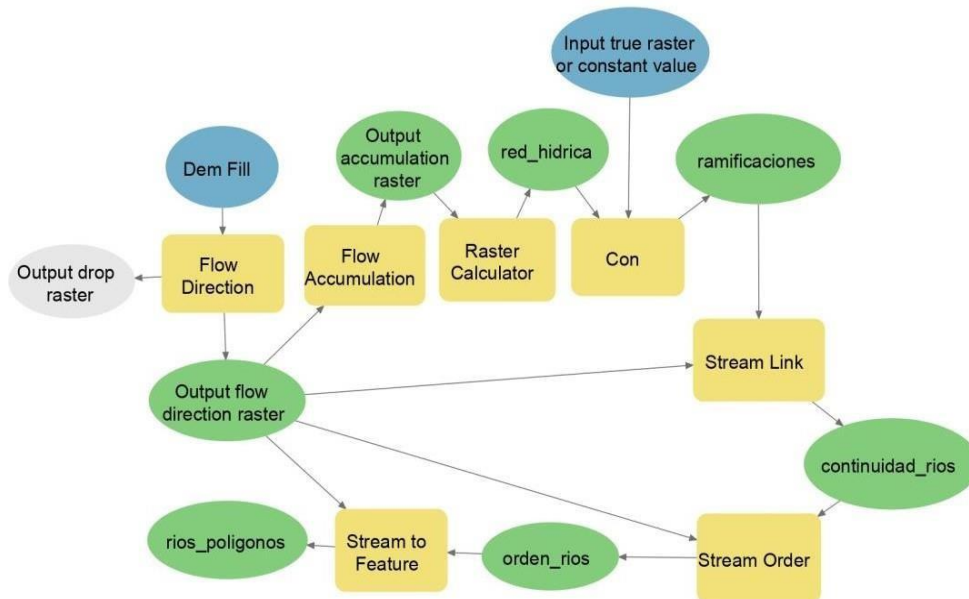


Figura 5. Modelo de trabajo para la extracción de la red de drenaje.
Realizado por: Belén Benites, 2022

Subcuencas hidrográficas atravesadas por la falla

El análisis se genera bajo el límite espacial que se obtiene con la delimitación de las subcuencas. Se colocó los puntos de desfogue en los ríos que se consideran de mayor densidad por donde atraviesa la falla Tena y con las capas ya producidas de *flow accumulation*, *flow direction* y la herramienta de *watershed* se procedió a obtener las cuencas individuales y pasar de un formato ráster a polígono. El modelo propuesto (Fig. 6) se aplicó a cada uno de los ríos principales.

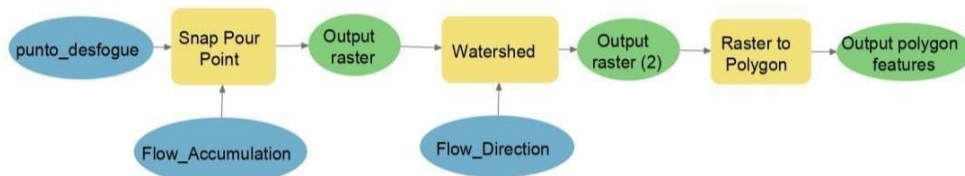


Figura 6. Modelo de trabajo para delimitar cuencas hidrográficas en el análisis espacial.
Realizado por: Belén Benites, 2022

Cálculo de índices geomorfológicos

Sinuosidad de frente de montaña (smf)

Se creó un mapa de pendientes de la zona de estudio extraídas del DTM utilizando la reclasificación de porcentaje de las pendientes con rango 0-26 para pendientes suaves a medias y >26 para pendientes fuertes, con el objetivo de trazar el frente montañoso Lmf. Se seleccionaron 10 tramos del sector como los más representativos para trazar las

líneas rectas asociadas L_s . Se calcularon las longitudes de L_{mf} y L_s estos valores son reemplazados en la ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1. } S_{mf} = 100 \left(\frac{L_{mf}}{L_s} \right)$$

Los valores son clasificados según Bull (2011) de la siguiente manera: frente de montaña inactivo $S_{mf} > 3$; frente de montaña moderadamente activo S_{mf} de 1.5-3 y frente de montaña altamente activo de 1.0-1.5

Asimetría de cuenca de drenaje (AF)

Se calculó el área total de cada una de las 6 subcuencas hidrográficas y la creación de polígonos del área a la derecha del río principal de las subcuencas, se produjo un mapa de densidades de la red de drenaje con el fin de conocer que ríos son los principales e inferir mejor el área de drenaje a la derecha de cada subcuenca (Fig. 10a). Con la herramienta "Calculate geometry" se procedió a aplicar la ecuación 2.

$$\text{Ecuación 2. } A_f = 100 \left(\frac{A_r}{A_t} \right)$$

Los valores son tratados con rangos que se obtienen restando a 50 valores el valor obtenido de AF (Pérez-Peña et al., 2010).

Radio de elongación (Re)-formas de cuenca

Se calculó las áreas de las 6 subcuencas hidrográficas que permitieron determinar el diámetro de un círculo que representa el área en cada subcuenca (R_c), el cálculo de las longitudes de los ríos principales de la red de drenaje que se consideran las partes más distantes de cada cuenca (L). Estos valores son llevados a una tabla de Excel para reemplazarlos en la ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3. } R_e = \frac{R_c}{L}$$

Los valores son clasificados como: circular 1-0.8; levemente elongada 0.79-0.7; elongada 0.69-0.4; altamente elongada: 0.39-0.2 (Bhat et al., 2013).

Índice de Hack (índice de gradiente-metro)

Se requirió la creación de un modelbuilder donde fueron utilizados la red de drenaje y el DTM para calcular los valores de SL (Stream-length gradient) y resaltar zonas con levantamientos anómalos (knickpoints). Se generaron puntos a lo largo de la red de

drenaje que fueron divididos en segmentos de 50m correspondientes al dl . Además, se interpolaron los valores de altura del DTM con la red drenaje para obtener valores de altitud mínima y máxima de cada tramo es decir el dh . Con el uso de la herramienta *flow length* se obtuvo la longitud desde los puntos medios hasta la cabecera del drenaje correspondiente al L . Se calculó según la ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4. } SL = \left(\frac{dh}{dl}\right) * L$$

Se realizó un mapa de distribución de kriging de los valores calculados considerando la clasificación por cuantil con clases de 4 partes.



Figura 7. Modelo de trabajo para calcular el índice de Hack (SL) y obtener los puntos anómalos (knicpoints).

Realizado por: Belén Benites, 2022

RESULTADOS

Traza de la falla, extracción de drenajes, delimitación de cuencas

Se cartografió la falla Tena Fig. 8 estimando una longitud de deformación de 21,97 km y una orientación NNE-SSO entre la zona de separación del piedemonte y Subandino, se obtuvo una red de drenaje de todo el archivo DTM con un orden de 1 a 8 (Strahler, 1952) y de donde se tomaron como puntos de desfogue los ríos de orden 3 por ser los más cercanos a la falla con estos puntos junto con el modelo de dirección de flujos se obtuvieron 6 subcuencas hidrográficas (Fig. 9) atravesadas por la falla Tena.

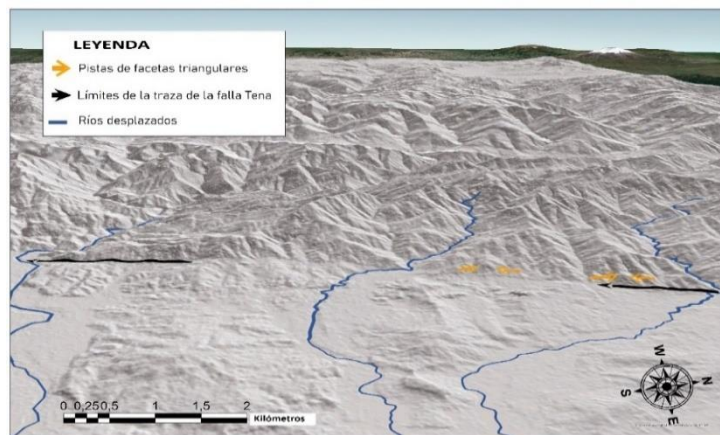


Figura 8. Mapa de evidencias geomorfológicas (drenajes desplazados y facetas triangulares y trapezoidales).

Realizado por: Belén Benites, 2022

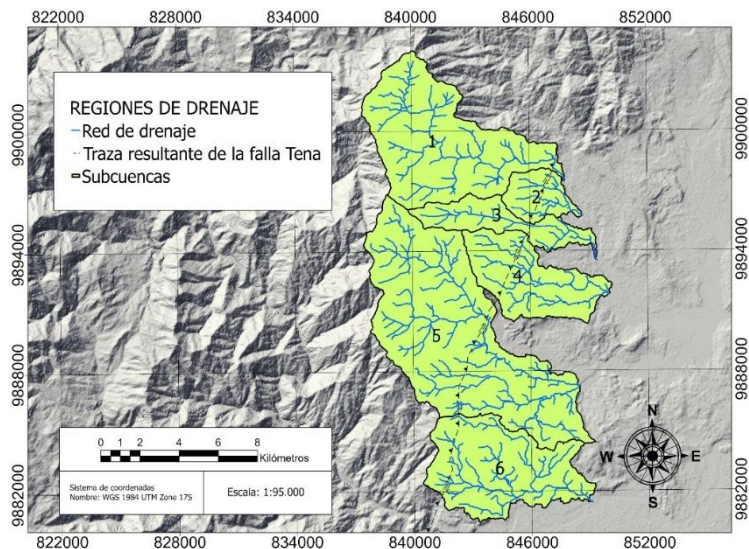


Figura 9. Delimitación de las subcuencas y regiones de drenaje. Falla Tena cartografiada con tendencia al NNE-SSO.

Realizado por: Belén Benites, 2022

En cuanto a los índices geomorfológicos la serie de datos empleada permitió diferenciar los siguientes valores respecto a las 6 subcuencas:

Asimetría de cuenca de drenaje (AF)

El índice AF cercano a 50 representa una condición estable. Este factor se debe expresar como un valor absoluto menos 50 (Pérez-Peña et al., 2010). Las AF normalizadas son, $AF < 5$, simétrica; $AF = 5-10$, levemente asimétrica; $AF = 10-15$, cuencas moderadamente asimétricas, y $Af > 15$, fuertemente asimétricas. En la *Tabla 1* se detallan los resultados, detectando 1 subcuenca simétrica, 1 subcuenca moderadamente asimétrica, 4 subcuencas fuertemente asimétricas. Siendo las subcuencas 2, 4, 5 y 6 las de mayor basculamiento, y la subcuenca 6 con un patrón de dirección opuesto de basculamiento al resto de subcuencas. En la (Fig. 10a) se muestra el mapa de densidades de la red de drenaje. En la (Fig. 10b) se muestra la clasificación de las asimetrías en las subcuencas y las direcciones de basculamiento indicadas por las flechas.

Tabla 2. Resultados índices de asimetría (AF) e índice normalizado en su valor absoluto menos 50 en las 6 subcuencas del área de estudio.

N° subcuenca	At (km ²)	Ar (km ²)	AF	AF normalizado	Rang ^o	Clasificación
1	41.22	26.12	63.36	13.36	10-15	Moderadamente asimétrica
2	7.23	5.42	74.97	24.97	>15	Fuertemente asimétrica
3	11.58	6.15	53.11	3.11	<5	Simétrica
4	20.39	14.58	71.49	21.49	>15	Fuertemente asimétrica
5	66.52	54.04	81.24	35.87	>15	Fuertemente asimétrica
6	30.29	10.25	33.85	16.15	>15	Fuertemente asimétrica

*At (km²): Área de drenaje total en kilómetros cuadrados de cada subcuenca; Ar (km²): Área a la derecha del cauce principal de cada subcuenca; AF: Factor de asimetría.

Realizado por: Belén Benites, 2022

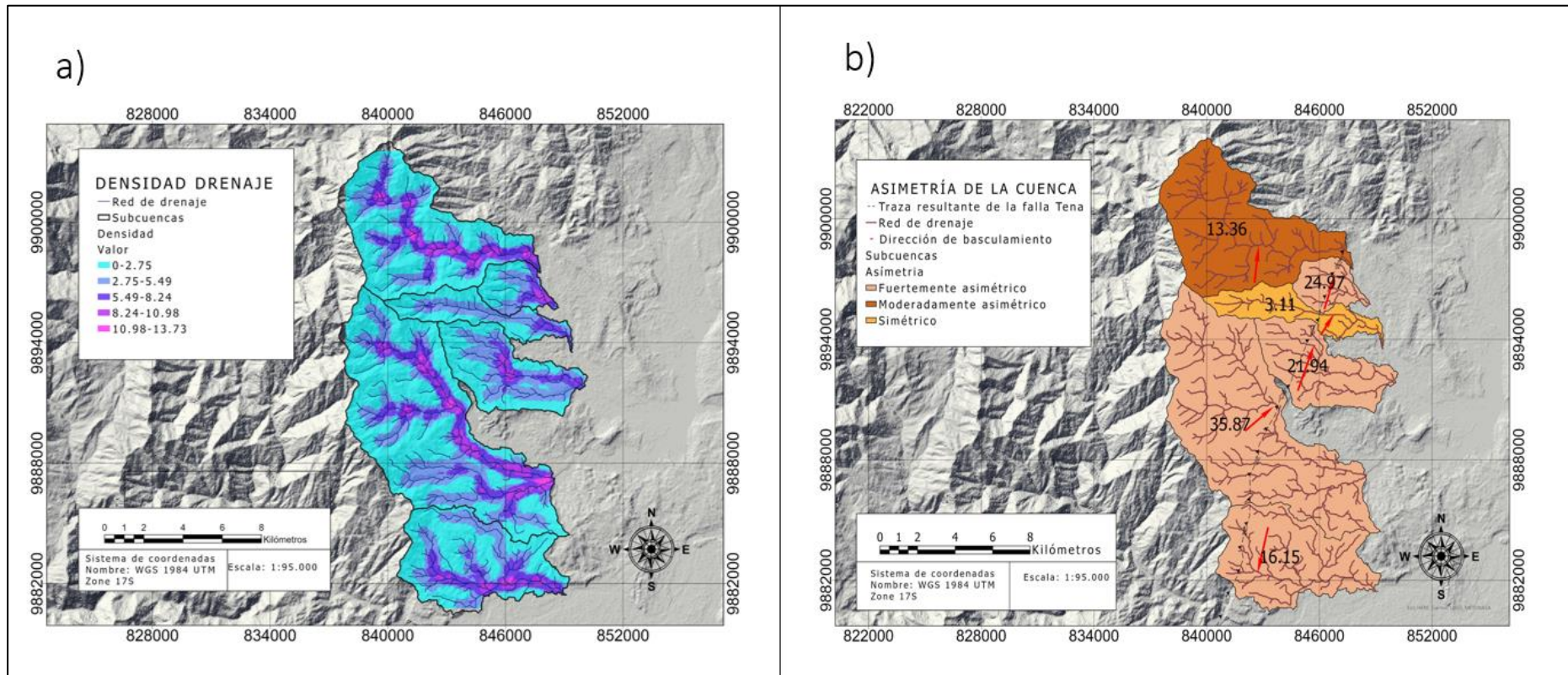


Figura 10. a) Mapa de densidad de los ríos principales, b) Mapa que muestra el factor de asimetría de las subcuencas y la dirección de inclinación relacionada con la tectónica activa relativa.

Realizado por: Belén Benites

Sinuosidad de frente de montaña (Smf)

Se delimitó 10 segmentos en la falla para calcular los valores de frente montañoso entre el piedemonte y la zona de montaña. El criterio de selección de los puntos de medición se basó en dividir cada subcuenca en dos segmentos a lo largo de su ancho a excepción de las subcuencas 1 y 3 debido a lo poca anchura de las subcuencas. Se utilizó la clasificación de (Bull, 2009) para conocer la actividad tectónica en dichos segmentos donde los valores fueron clasificados como: [1.0-1.5] altamente activo, [1.5-3.0] moderadamente activo e [3-10] inactivo. En la (Fig. 11) se observa los segmentos que fueron utilizados sobre la base de un mapa de pendiente reclasificado separando las zonas altas de las zonas planas.

La mayoría de los segmentos elegidos de la zona presenta una actividad entre moderada y altamente activa, donde las subcuencas 2 y 3 muestran valores con mayor actividad tectónica mientras que la subcuenca 5 y el segmento final de la subcuenca 6 corresponden a una tectónica inactiva.

Tabla 3. Resultados aplicación de sinuosidad de frente de montaña para las 6 subcuencas del área de estudio

N° subcuenca	Segmento	Lmf	Ls	Smf	Rango	Actividad tectónica
1	1	2.06	0.79	2.60	(1.5-3)	Moderadamente activo
2	2	3.08	1.41	2.19	(1.5-3)	Moderadamente activo
2	3	1.86	1.45	1.28	(1.5-3)	Moderadamente activo
3	4	1.01	0.63	1.59	(1.5-3)	Moderadamente activo
4	5	3.65	1.93	1.88	(1.5-3)	Moderadamente activo
4	6	4.52	1.95	2.32	(1.5-3)	Moderadamente activo
5	7	15.08	2.82	4.70	>3	Inactivo
5	8	8.72	2.82	3.09	>3	Inactivo
6	9	4.37	2.54	1.72	(1.5-3)	Moderadamente activo
6	10	7.43	1.92	3.86	>3	Inactivo

*Lmf: Largo del frente de montaña entre el piedemonte y el valle; Ls: Línea recta paralela al frente de montaña; Smf: Sinuosidad de frente de montaña.

Realizado por: Belén Benites, 2022

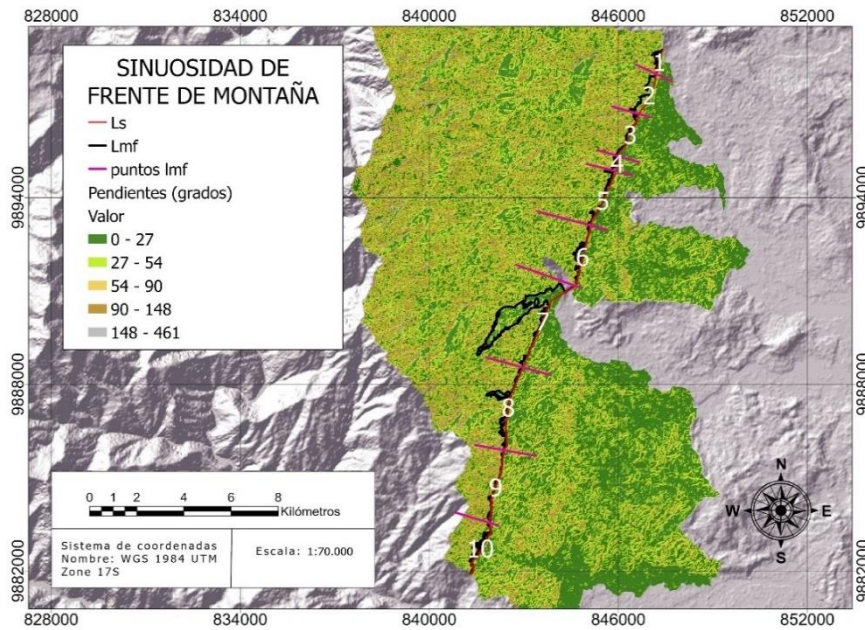


Figura 11. Ubicación espacial de los 10 tramos utilizados para el cálculo de la sinuosidad de frente de montaña en un mapa de pendientes del área de estudio.

Realizado por: Belén Benites, 2022

Índice de forma de la cuenca (Re)

En la Fig. 12 se compararon a cada una de las 6 subcuencas con un círculo que representa las mismas áreas y la longitud de los principales ríos para definir el diámetro y el radio de elongación y definir la forma de las subcuencas. En la tabla 4, se observan los rangos para definir los valores activos de los inactivos, solo los valores de la subcuenca 2 corresponde a un valor elongado mientras que el resto de las subcuencas son consideradas altamente elongadas basándonos en la clasificación de (Bhat et al., 2013): altamente elongadas (0.2-0.39), elongadas (0.4-0.69), levemente elongadas (0.7-0.79) y no elongadas (0.8-1) que permite diferenciar las zonas con actividad tectónica de las que no.

Tabla 4. Radios de elongación para las 6 subcuencas del área de estudio

N° subcuenca	A (km ²)	L (km)	Re	Rango	Clasificación
1	41.22	15.25	0.27	0.2-0.39	Altamente Elongada
2	7.23	4.18	0.41	0.4-0.59	Elongada
3	11.58	10.90	0.20	0.2-0.39	Altamente Elongada
4	20.39	9.53	0.30	0.2-0.39	Altamente Elongada

					Elongada
5	66.52	16.28	0.32	0.2-0.39	Altamente
6	30.29	10.98	0.32	0.2-0.39	Elongada
					Altamente
					Elongada

*A (km²): Área en kilómetros cuadrados de las subcuencas; L (km): Longitud del cauce principal medido en kilómetros de cada subcuenca; Re: índice de circularidad.

Realizado por: Belén Benites, 2022

Índice de Hack (SL)

El índice de Hack permite cuantificar las perturbaciones en la red hídrica. Se propone un procedimiento geoestadístico para obtener un mapa general con el índice SL a través de la interpolación y filtrado de los valores estimados a lo largo de la red de drenaje del área de estudio (Fig. 13a). El conjunto de datos puntuales obtenidos de SL se interpoló utilizando el algoritmo krigging ordinario (Piacentini et al., 2020). Este método permite computar los valores de SL y evaluar su distribución espacial y definir las anomalías en SL. Los valores de las anomalías permiten detectar movimientos verticales no obstante existen zonas tectónica inactiva que tienen gradientes pronunciadas atribuidas a rocas resistentes por ello los valores fueron plasmados en un mapa de litología como un control litológico (Fig. 13b). Se observó que las subcuencas 1,3 y 5 son las que exponen zonas con mayores puntos de anomalías.

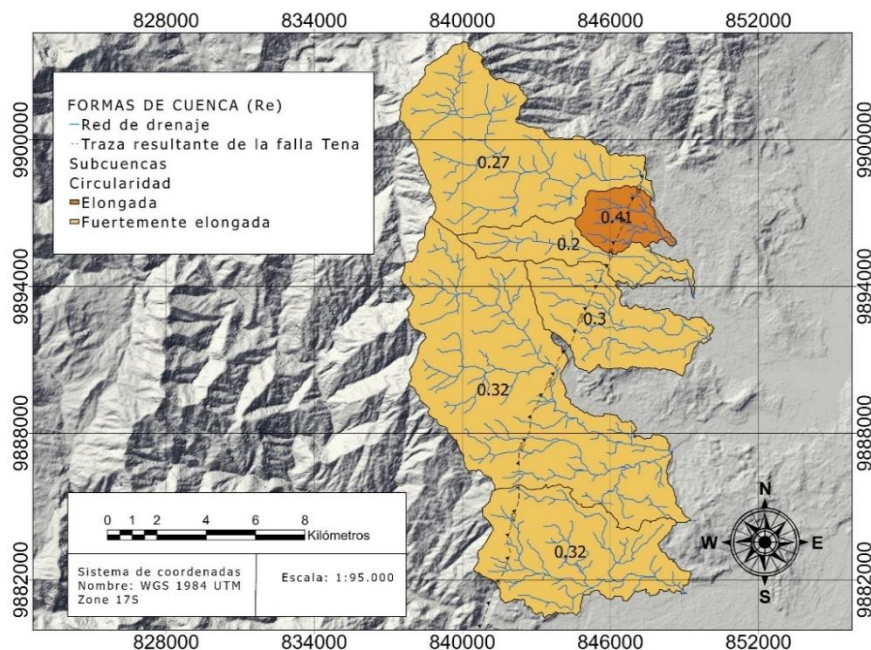


Figura 12. Índice de circularidad de las subcuencas y cartografía de la falla Tena.

Realizado por: Belén Benites, 2022

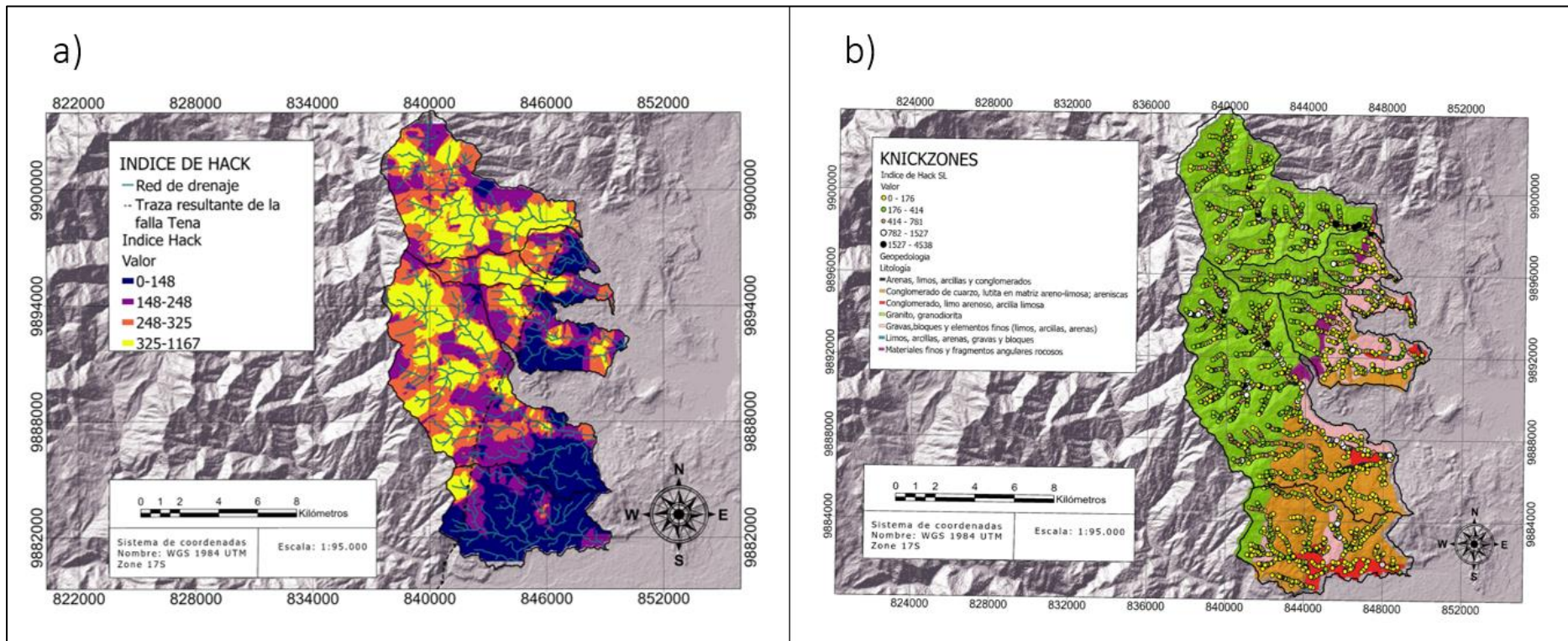


Figura 13. Mapa de distribución SL, a) valores del índice de Hack y principales estructuras de la zona de estudio, b) puntos de anomalías superpuesta sobre un mapa de litología de la zona de estudio.

Realizado por: Belén Benites, 2022

DISCUSIÓN

Cartografía de la falla Tena

Las imágenes de satélite, el DTM y la red de drenaje presentan evidencia geomorfológica de sistemas fluviales desplazados de los ríos Tena, Pano y Jatunyacu consignos de desplazamiento horizontal. La evolución esquemática de los desvíos de los ríos es consecuencia del crecimiento de los pliegues (Bès de Berc et al., 2002). Además de la faceta triangular de la subcuenca 4. La falla se traza entre los ríos Tena al NNE y Jatanyuca al SSO. En consecuencia, el segmento principal de la traza de falla tiene un rumbo NNE-SSW (Fig. 7 y Fig. 8), común entre las fallas que conforman el frente orogénico en el Subandino (Baby et al., 2004). Se infiere que la falla Tena es de naturaleza transcurrente-inversa. Por lo tanto, tuvo un importante movimiento vertical debido a la presencia de facetas triangulares que son signo de ambientes tectónicos como escarpes de fallas normales y cabalgamiento (Bahrami, 2012; Bull, 2007). Además, de un importante movimiento horizontal inferido por el desplazamiento de los ríos, que son reflejo del control estructural y fallas de deslizamiento (Bierman et al., 2014).

División de las subcuencas

Para fines pertinentes en la división de las subcuencas no se tomó en cuenta la ramificación principal del río Jatunyacu debido a su gran extensión ya que los resultados pueden verse afectados por la presencia de otras fallas hacia el Oeste. Sin embargo, se consideró una rama secundaria del Jatunyacu para delimitar la subcuenca 6. La cual representa una transición física de la erosión del canal y los mecanismos de transporte a gran escala a la erosión de las laderas y los mecanismos de transporte a pequeña escala (Tarboton et al., 1991).

Análisis de los índices geomorfológicos

El índice AF detecta la inclinación transversal tectónica y la migración lateral de los ríos (Pérez-Peña et al., 2010). Las subcuencas 2, 4, 5, 6 con índice AF presentan valores fuertemente asimétricos que son reflejo de tectónica activa. Se infiere que las redes de drenaje de las subcuencas 2, 4, 5 tienen un sentido de migración hacia el NNE (Fig. 2), por lo que su dirección de basculación tiene esta tendencia. En cambio, la subcuenca 6 tiene una dirección opuesta de migración de la red hídrica. Se interpreta que este comportamiento se debe a la presencia de geoformas de alto relieve montañoso en el

lado izquierdo de la subcuenca 6 (MAG-SIGTierras, 2014). La subcuenca 3 que es asimétrica presenta un control estructural de la orientación del lecho que desempeña un papel principal en el desarrollo de la asimetría (Alipoor et al., 2011).

El índice Smf mide la relación entre la erosión que corta el inicio de los valles y las fuerzas tectónicas que crean el frente montañoso (Keller & Pinter, 2002). Las áreas pertenecientes a la subcuenca 5 y el segmento 10 de la subcuenca 6 tienen valores altos de Smf. La subcuenca 5 se vinculó a la litología compuesta principalmente por areniscas con poca resistencia a la erosión (Bierman et al., 2014). Mientras que la subcuenca 6 presenta diferencias en el índice Smf en sus dos segmentos. Se ha inferido que se debe al tipo de geoformas presentes en cada segmento. El segmento 9, se trata de una geoforma de alto relieve montañoso. Mientras que el segmento 10, una geoforma de extensión de glaciares cuya naturaleza es erosiva (García-Tortosa et al., 2011; MAG-SIGTierras, 2014).

Las demás subcuencas presentan una tectónica moderadamente activa, se infiere que hay levantamiento de los bloques corticales y que la erosión no se desarrolló en gran medida debido a que las subcuencas 1,2,3,4 están formadas por finos materiales (limonitas, arcillas) con resistencia a la erosión debido a la alta cohesión (Bierman et al., 2014). En los frentes de montaña controlados tectónicamente se provoca el colapso del bloque colgante a lo largo de la zona de falla y el rápido levantamiento del bloque de pie (Softa et al., 2018; Burbank & Anderson, 2009) y la formación de las facetas triangulares de la subcuenca 4 y 2.

El índice Re, la mayoría de las subcuencas tienen un valor de muy alargadas, indicando zonas de actividad tectónica más intensa orientadas en sentido E-W, la subcuenca 2 es menos alargada debido a que la migración de sus cuencas y la captación de sedimentos cubren un área menor que el resto de las subcuencas, dando más circularidad a la forma de la subcuenca 2. Al sistema regional se le atribuye una evolución de drenaje de oeste a este, donde la inmadurez del drenaje en las serranías como en el caso de la red de drenaje de interés caracteriza estructuras tectónicas en crecimiento (Bès de Berc et al., 2005).

El índice de Hack identifica secciones empinadas que pueden reflejar signos de tectónica activa (Toural & Moreiras, 2017). Puesto que los ríos responden antes que las pendientes el índice de Hack detecta pequeñas perturbaciones susceptibles en los gradientes de los ríos (Burbank & Anderson, 2009). Las subcuencas 1,3,4,5 tienen los

valores más altos del análisis del índice de Hack. Se descarta que existan anomalías en la zona occidental de las subcuencas, ya que de su litología se infiere que los levantamientos son causados por la resistencia de rocas tipo granito. O la presencia de escombros inmóviles depositados en el cauce por deslizamientos o flujos de escombros (Bierman et al., 2014). En la parte este, la subcuenca 3 tiene el desarrollo de una red de drenaje de tipo paralelo con fuertes pendientes regionales. Aunque las subcuencas 1,4,5 presentan signos de levantamiento en áreas con litología con rocas menos resistentes, atribuyéndolo a tectónica activa (Softa et al., 2018; Piacentini et al., 2020; Wei et al., 2015).

El resultado de la cartografía de la falla Tena difiere en la longitud de la falla de 21,5 km mientras que, según Egüez et al., (2003) la longitud de la falla es de 35 km y en el proyecto SARA (Costa et al., 2020) tiene una longitud de 29.1 km, por otra parte, el estudio ha concordado con la naturaleza de la falla de tipo transcurrente-inverso propuesto por (Costa et al., 2020) y no solo de tipo inverso (Egüez et al., 2003).

Finalmente, los resultados permiten inferir que la falla Tena corresponde a una falla de naturaleza transcurrente-inversa con 21,51 km de longitud. Además de proponer que la falla Tena tiene un movimiento heterogéneo que varía en cada subcuenca, en donde la zona de mayor actividad tectónica corresponde al NNE de la falla reflejada por los valores cuantitativos de los índices geomorfológicos.

CONCLUSIONES

La cartografía de la falla Tena trazada a través de evidencias geomorfológicas permitió una mayor precisión de la geometría y longitud de la falla de 21,51 km de longitud y una tendencia NNE-SSO.

La aplicación de los índices geomorfológicos llevo a cabo este análisis de manera exitosa permitiendo clasificar el área de estudio como una zona de tectónica activa a pesar de su condición de meteorización tropical y alta vegetación.

La falla Tena presenta evidencias de deformación y tectónica activa se demuestra a travésde la correlación entre los valores obtenidos por el índice de Hack (SL), sinuosidad del frente montañoso (Smf), forma de la cuenca (Re) y asimetría de la cuenca (AF). Con los resultados cuantitativos se deduce que la mayor actividad tectónica se ubica enla zona NNE de la falla Tena.

REFERENCIAS

- Alipoor, R., Poorkermani, M., Zare, M., & el Hamdouni, R. (2011). Active tectonic assessment around Rudbar Lorestan dam site, High Zagros Belt (SW of Iran). *Geomorphology*, 128(1–2), 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2010.10.014>
- Almeida, G., & Sourdat, M. (1983). *Génesis geológica y morfológica de la Amazonia, sus implicaciones actuales para el desarrollo de la región*. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/carton03/22642.pdf
- Alvarado, A. (2012). *Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur (PhD Thesis)*. Université de Grenoble.
- Baby, P., Rivadeneira, M., Christophoul, F., & Barragan, R. (1999). Style and timing of deformation in the Oriente Basin of Ecuador. *Extended Abstract* ..., 68–72. https://www.academia.edu/2099320/Style_and_timing_of_deformation_in_the_Oriente_Basin_of_Ecuador
- Baby, Patrice, ed, Rivadeneira, & Barragan. (2004). *La cuenca oriente : geología y petroleo*.
- Bahrami, S. (2012). Morphotectonic evolution of triangular facets and wine-glass valleys in the Noakoh anticline, Zagros, Iran: Implications for active tectonics. *Geomorphology*, 159–160, 37–49. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2012.03.003>
- Barragan, R., Geist, D., Hall, M., Larson, P., & Kurz, M. (1998). Subduction controls on the compositions of lavas from the Ecuadorian Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 154(1–4), 153–166. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00141-6)
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., & Singaicho, J. C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587–1996). *Geophysical Journal International*, 181(3), 1613–1633. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.2010.04569.X>
- Bès de Berc, S., Baby Patrice, Soula Jean-Claude, Souris M., & Rosero Jaime. (2002). *Uplift and active deformation of the Pastaza alluvial fan (Subandean zone of Ecuador)*. https://www.researchgate.net/publication/303786854_Uplift_and_active_deformation_of_the_Pastaza_alluvial_fan_Subandean_zone_of_Ecuador
- Bès de Berc, S., Soula, J. C., Baby, P., Souris, M., Christophoul, F., & Rosero, J. (2005). Geomorphic evidence of active deformation and uplift in a modern continental wedge-top–foredeep transition: Example of the eastern Ecuadorian Andes. *Tectonophysics*, 399(1–4), 351–380. <https://doi.org/10.1016/J.TECTO.2004.12.030>
- Bhat, F. A., Bhat, I. M., Sana, H., Iqbal, M., & Mir, A. R. (2013). Identification of geomorphic signatures of active tectonics in the West Lidder Watershed, Kashmir Himalayas: Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*.
- Bierman, P. R., Montgomery, D. R., University of Vermont., & University of Washington. (2014). *Key concepts in geomorphology*. 21.
- Bull, W. (2007). *Tectonic Geomorphology of Mountains: A New Approach to Paleoseismology*. Blackwell Publishing.
- Bull, W. B. (2009). *Tectonically Active Landscapes*. Blackwell Publishing.
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2009). *Tectonic Geomorphology*.
- Chunga K., Michetti A., Gorshkov A., Panza G., Soloviev A., & Martillo C. (2010). *Aplicación del método de zonación morfo-estructural para identificar nudos sismogénicos en la región costera y cadenas montañosas de los Andes septentrionales del Ecuador*. https://www.inocar.mil.ec/web/phocadownloadpap/actas_oceanograficas/acta16/OCE1601_10.pdf
- Costa, C., Alvarado, A., Audemard, F., Audin, L., Benavente, C., Bezerra, F. H., Cembrano, J., González, G., López, M., Minaya, E., Santibañez, I., García, J., Arcila, M., Pagani, M., Pérez, I., Delgado, F., Paolini, M., & Garro, H. (2020). Hazardous faults of South America; compilation and overview. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102837. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102837>
- Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M. N., Costa, C., & Dart, R. L. (2003). *Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions Open-File Report 03-289*.
- Egüez A., Gaona M., Alban A., Pinto C., Toinga S., & Gallardo E. (2017). *Mapa geológico de la república del Ecuador. Escala 1: 1000000*.
- Esri. (2020). *Environmental Systems Research Institute*.
- García-Tortosa, F. J., Alfaro, P., Sanz De Galdeano, C., & Galindo-Zaldívar, J. (2011). Glacis geometry as a geomorphic marker of recent tectonics: The Guadix-Baza basin (South Spain). *Geomorphology*, 125, 517–529. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.021>
- Graveleau, F., Strak, V., Dominguez, S., Malavieille, J., Chatton, M., Manighetti, I., & Petit, C. (2015). Experimental modelling of tectonics–erosion–sedimentation interactions in compressional, extensional, and strike–slip settings. *Geomorphology*, 244, 146–168. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2015.02.011>
- Gupta, L., Agrawal, N., Dixit, J., & Dutta, S. (2022). A GIS-based assessment of active tectonics from

- morphometric parameters and geomorphic indices of Assam Region, India. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 8, 100115. <https://doi.org/10.1016/J.JAESX.2022.100115>
- Hamdouni, R., Irigaray, C., Fernández, T., Chacón, J., & Keller, E. A. (2008). Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain). *Geomorphology*, 96(1–2), 150–173. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2007.08.004>
- Jaberi, M., Ghassemi, M. R., Shayan, S., Yamani, M., Zamanzadeh, S. M., Jaberi, M., Ghassemi, M. R., Shayan, S., Yamani, M., & Zamanzadeh, S. M. (2018). Interaction between active tectonics, erosion and diapirism, a case study from Habbale-Rud in Southern Central Alborz (Northern Iran). *Geomo*, 300, 77–94. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2017.01.031>
- Jaillard, E., Herail, G., Monfret, T., Dfaz-Martínez, E., Baby, P., & Dumont, J. F. (2000). *Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northern Chile*. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers19-02/010074719.pdf
- Keller, E., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape*. Prentice Hall.
- MAG-SIGTierras. (2020). *Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica*. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/index.php/visor-geo>
- MAG-SIGTierras. (2022). *Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica*. *Geoportal*. <http://geoportal.sigtierras.gob.ec:8080/GeoserverViewer/>
- Mahmood, S. A., & Gloaguen, R. (2012). Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis. *Geoscience Frontiers*, 3(4), 407–428. <https://doi.org/10.1016/J.GSF.2011.12.002>
- Marocco, R., & Winter, T. (1997). *Bosquejo de la evolución geodinámica del Ecuador. Los paisajes naturales del Ecuador*. (Vol. 1, pp. 16–52). https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-09/010022382.pdf
- Ministerio de agricultura y ganadería MAG-SIGTierras. (2014). *Catálogo descriptivo de objetos geomorfológicos del Ecuador*.
- Molano Cárdenas, S. M., & Torres Rodríguez, M. D. (2018). *Índices geomorfológicos como herramienta para la caracterización de la actividad neotectónica del sistema de fallas de Soapaga entre los municipios de Corrales y Pesca*.
- Piacentini, D., Troiani, F., Servizi, T., Nesci, O., & Veneri, F. (2020). SLiX: A GIS Toolbox to Support Along-Stream Knickzones Detection through the Computation and Mapping of the Stream Length-Gradient (SL) Index. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2020, Vol. 9, Page 69, 9(2), 69. <https://doi.org/10.3390/IJGI9020069>
- Softa, M., Emre, T., Sözbilir, H., Spencer, J. Q. G., & Turan, M. (2018). Geomorphic evidence for active tectonic deformation in the coastal part of Eastern Black Sea, Eastern Pontides, Turkey. *Geodinamica Acta*, 30(1), 249–264. <https://doi.org/10.1080/09853111.2018.1494776>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional 773 topography. *Geological Society of America Bulletin*, 1117–1142.
- Tarboton, D., Bras, R., & Rodriguez, I. (1991). ON THE EXTRACTION OF CHANNEL NETWORKS FROM DIGITAL ELEVATION DATA. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, 5, 81–100. <https://hydrology.usu.edu/dtarb/hp91.pdf>
- Toural Dapoza, R., & Moreiras, S. M. (2017). *Aplicación de índices geomorfológicos en el piedemonte neotectónicamente activo de Mendoza (32° S)*. <https://revistas.unlp.edu.ar/geoacta/article/view/13597/12460>
- Trenkamp Robert, Kellogg James N, Freymueller Jeffrey T., & Mora Hector P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 157-171. https://www.researchgate.net/publication/291520483_Wide_plate_margin_deformation_southern_Central_America_and_northwestern_South_America_CASA_GPS_observations
- Vicente Pérez-Peña, J., Azor, A., Azañón, M., & Keller, E. A. (2010). *Active tectonics in the Sierra Nevada (Betic Cordillera, SE Spain): Insights from geomorphic indexes and drainage pattern analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.02.020>
- Wei, Z., Bi, L., Xu, Y., & He, H. (2015). Evaluating knickpoint recession along an active fault for paleoseismological analysis: The Huoshan Piedmont, Eastern China. *Geomo*, 235, 63–76. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2015.01.013>