

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Modelamiento Hidrogeológico como base para caracterización  
morfométrica al sureste de Santa Cruz, Galápagos

INGE-2233

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Geología**

Presentado por:

Victoria Michelle Rosado Zambrano

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## Dedicatoria

---

El presente proyecto se lo dedico a mis queridos padres, mis eternas fuentes de inspiración y razones primordiales de mi esfuerzo diario. Su apoyo incondicional ha sido el pilar fundamental a lo largo de mi formación académica, guiándome con dedicación y alentándome en cada paso. A ellos, que me han moldeado como individuo con valiosos principios de manera desinteresada, entregándolo todo por el amor hacia mi persona.

## Agradecimientos

---

Agradezco sinceramente a mis queridos padres, por su apoyo incondicional en esta etapa crucial de mi vida.

Al PhD. Maurizio Mulas, al Msc. Daniel Garces y al Ing. Erwin Larreta, les expreso mi gratitud por su paciencia, entrega y amor por la docencia. El constante apoyo, palabras de aliento y creencia en mis capacidades han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

A Valeria, le agradezco su compañía, haciendo más ameno y cálido mi tiempo en ESPOL. Su amistad ha sido un tesoro invaluable en esta travesía universitaria.

A todos los docentes, gracias por iluminar mi camino con conocimiento, inspiración y dedicación. Su labor ha dejado una huella imborrable en mi formación.

## Declaración Expresa

---

Yo Victoria Michelle Rosado Zambrano acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 09 del 2024.



---

Victoria Michelle Rosado Zambrano

# Evaluadores



Firmado electrónicamente por:  
DAVID RICARDO  
ALTAMIRANO MORAN

---

**Msc. David Altamirano**

Profesor de Materia



Firmado electrónicamente por:  
MAURIZIO MULAS .

---

**PhD. Maurizio Mulas**

Tutor de proyecto



Firmado electrónicamente por:  
DANIEL OMAR GARCES  
LEON

---

**Msc. Daniel Garces**

Cotutor de Proyecto

## Resumen

Las Islas Galápagos generan un interés científico debido a sus particulares características geológicas, geográficas, oceanográficas y biológicas. Sin embargo, la falta de información geológica y geográfica, originada por la lejanía, la dificultad de acceso y la limitación de fondos, ha dificultado considerablemente el conocimiento de la dinámica en estas islas. Para abordar esta insuficiencia, se propone hacer un estudio geomorfológico y estructural, usando análisis de modelos digitales de terreno para evaluar el comportamiento geológico e hidrológico. El enfoque de la investigación se centra en utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG), como modelos digitales de terreno y sensores remotos, para analizar las estructuras y geoformas geológicas en las Islas Galápagos. Se han caracterizado las estructuras geomorfológicas, y se desarrolló una herramienta de análisis de geoformas, considerando la tipología de drenaje y características morfométricas. Se reconocieron diversas tipologías de redes de drenaje, como radial, paralela, barbada, angulada y desordenada, así como 5 unidades fisiográficas: zonas montañosas, colinas altas, colinas medias, colinas bajas y lomadas, sugiriendo la presencia de distintos contextos geológicos superficiales en la zona. En la parte sur del área de estudio, se determinaron lineamientos en dirección NO-SE, con longitudes que varían entre 4000 y 3000 m. Este enfoque metodológico busca contribuir significativamente al conocimiento científico ya que enriquecen la comprensión de la evolución geológica de la isla, facilitando la identificación de zonas de muestreo en campo. Además, estos resultados pueden tener aplicaciones técnicas significativas en diversos campos, como el estudio de riesgos geológicos, la planificación territorial, la gestión de recursos hídricos y la conservación de las islas y sus especies, ampliando así su impacto en la toma de decisiones y el desarrollo sostenible de las islas.

**Palabras clave:** Islas Galápagos, geomorfología, sistemas de información geográficos, sensores remotos, tipologías de Drenaje.

## ***Abstract***

The Galapagos Islands generate scientific interest due to their particular geological, geographical, oceanographic and biological characteristics. However, the lack of geological and geographical information, caused by remoteness, difficulty of access and limited funds, has considerably hindered the knowledge of the dynamics on these islands. In order to address this insufficiency, it is proposed to carry out a geomorphological and structural study, using analysis of digital terrain models to evaluate the geological and hydrological behavior. The research focus is on using Geographic Information Systems (GIS), such as digital terrain models and remote sensing, to analyze geological structures and geofoms in the Galapagos Islands. The geomorphological structures were characterized, and a geofom analysis tool were developed, considering the drainage typology and morphometric characteristics. Various typologies of drainage networks were recognized, such as radial, parallel, barbed, angled and disordered, as well as 5 physiographic units: mountainous areas, high hills, medium hills, low hills and hills, suggesting the presence of different surface geological contexts in the zone. In the southern part of the study area, lineaments will be determined in a NW-SE direction, with lengths that vary between 4000 and 3000 m. This methodological approach seeks to contribute significantly to scientific knowledge as it enriches the understanding of the geological evolution of the island, facilitating the identification of field sampling areas. Furthermore, these results can have significant technical applications in various fields, such as the study of geological risks, territorial planning, water resources management and the conservation of islands and their species, thus expanding their impact on decision-making and the sustainable development of the islands.

**Keywords:** Galapagos Islands, geomorphology, geographic information systems, remote sensors, drainage typologies

## Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i> .....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas .....	V
Simbología .....	VI
Índice de Figuras.....	VII
Índice de Tablas .....	IX
Capítulo 1 .....	10
1.1    Introducción.....	11
1.2    Descripción del problema.....	12
1.3    Justificación del Problema.....	13
1.4    Objetivos .....	14
1.4.1    Objetivo General.....	14
1.4.2    Objetivos Específicos .....	14
1.5    Marco teórico .....	15
1.5.1    Análisis Hidrológico .....	15
1.5.2    Análisis Geomorfológico .....	19
1.5.3    Geomática .....	26
Capítulo 2.....	28
2.    Marco geodinámico .....	29
2.1    Marco tectónico-estructural .....	29
2.2    Geología.....	32
2.2.1    Geología Regional .....	32
2.2.2    Geología Local.....	35



2.3	Geomorfología .....	36
2.4	Hidrología.....	37
2.5	Zona de estudio .....	37
Capítulo 3.....		39
3.	Datos y métodos.....	40
3.1	Recursos digitales.....	40
3.2	Fase de Diseño .....	41
3.3	Metodología .....	43
3.3.1	Análisis hidrológico .....	44
3.3.2	Análisis geomorfológico.....	48
3.3.3	Análisis estructural.....	54
Capítulo 4.....		63
4.	Análisis de resultados.....	64
4.1	Mapa de tipologías de red de drenaje .....	64
4.2	Mapa Geomorfológico .....	67
4.3	Lineamientos estructurales .....	70
Capítulo 5.....		72
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	73
5.1	Conclusiones.....	73
5.2	Recomendaciones.....	74
Bibliografía .....		76
Apéndice .....		83

## Abreviaturas

<b>ATHR</b>	Angular difference threshold
<b>AOI</b>	Área de Interés
<b>GSC(1)</b>	Centro de ciencias de Galapagos
<b>GSC(2)</b>	Centro de Expansión de Galápagos
<b>CTN</b>	Consortio Tracasa
<b>E</b>	Este
<b>RADI</b>	Filter radius
<b>GAD</b>	Gobierno Autónomo Descentralizado
<b>GTHR</b>	Gradient threshold
<b>TPI</b>	Índice de Posición Topográfico
<b>INEC</b>	Instituto Nacional de Estadística y Censo
<b>LSP</b>	Land surface parameters
<b>LTHR</b>	Length threshold
<b>FTHR</b>	Line fitting error threshold
<b>DTHR</b>	Linking distance threshold
<b>Ma</b>	Millones de años
<b>DEM</b>	Modelo Digital de Elevación
<b>MDS</b>	Modelo Digital de Superficie
<b>N</b>	Norte
<b>O</b>	Oeste
<b>UNESCO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
<b>USGS</b>	Servicio Geológico de los Estados Unidos
<b>shp</b>	Shapefile
<b>SIG</b>	Sistemas de Información Geográficos
<b>S</b>	Sur
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator

## Simbología

<b>%</b>	porcentaje
<b>~</b>	Aproximadamente
<b>&lt;</b>	menor que
<b>&gt;</b>	mayor que
<b>cm</b>	centímetro
<b>km</b>	kilometro
<b>La</b>	lantano
<b>m</b>	metro
<b>Mg</b>	Magnesio
<b>msnm</b>	metros sobre el nivel del mar
<b>my</b>	millas por año
<b>NE</b>	noreste
<b>NO</b>	noroeste
<b>°</b>	grados
<b>Sm</b>	samarium
<b>SE</b>	sureste
<b>SO</b>	suroeste
<b>Yb</b>	iterbio

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Conceptos espaciales de modelos hidrológicos (Korres y Schneider, 2018)	16
<b>Figura 2.</b> Proceso de obtención de la dirección del flujo. a) Superficie de elevación; b) Codificación de la dirección del flujo; c) Dirección del flujo (Li y otros., 2019) .....	17
<b>Figura 3.</b> Proceso de obtención de la acumulación de flujo. a) Dirección del flujo; b) Acumulación del flujo (Olusola y otros ,2022) .....	17
<b>Figura 4.</b> Tipos de red de drenaje según la clasificación de Way (1978) .....	18
<b>Figura 5.</b> Numeración convencional para establecer relaciones en un DEM, según Aguirre (2009).....	22
<b>Figura 6.</b> Direcciones de curvatura marcadas naturalmente en la superficie S. (Olaya, 2009) .....	23
<b>Figura 7.</b> Métodos de clasificación del relieve, (Pedraza y otros.,1996 mod.) .....	24
<b>Figura 8.</b> Mapa del Archipiélago de Galápagos (Harpp y Geist, 2021) .....	29
<b>Figura 9.</b> Edades de las Islas Galápagos aumentan linealmente de oeste a este (Harpp y otros., 2014).....	30
<b>Figura 10.</b> Clasificación morfológica según Harpp y Geist (2018). .....	32
<b>Figura 11.</b> Mapas de variaciones geoquímicas y petrológicas en los volcanes de Galápagos (Harpp, K., y Geist, D., 2018).....	33
<b>Figura 12.</b> Área de estudio. (a) Territorio de las Islas Galapagos a nivel nacional, (b) Archipiélago de Galápagos - Isla Santa Cruz, (c) Área de estudio del proyecto.....	38
<b>Figura 13.</b> Guía de metodología general del proyecto.....	43
<b>Figura 14.</b> Flujo metodológico del análisis hidrológico para obtener la red de drenaje del AOI.....	44
<b>Figura 15.</b> Dirección de Flujo en el sector estudiado. ....	45
<b>Figura 16.</b> Acumulación de flujos (a) red de acumulación principal de cada celda del AOI, (b) red de acumulación principal y secundaria. ....	46
<b>Figura 17.</b> Cuencas que conFiguran la red de drenaje de la zona de estudio .....	47

<b>Figura 18.</b> Diseño metodológico para la obtención de datos en análisis geomorfológico .....	48
<b>Figura 19.</b> Modelo de Pendiente de la zona de estudio .....	49
<b>Figura 20.</b> Rasters iniciales de clasificación morfométrica según relieve y elevación de la zona de estudio.....	52
<b>Figura 21.</b> Esquema de Metodología de análisis estructural. ....	54
<b>Figura 22.</b> Filtros direccionados indicando realces de bordes (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°, (d) 135°, (e) 180°, (f) 225°, (g) 270°, (h) 315°. ....	56
<b>Figura 23.</b> Mapa de Índice de posición topográfica (TPI) de la zona de estudio. ....	58
<b>Figura 24.</b> Lineamientos extraídos automáticamente en el software CATALYST. ....	60
<b>Figura 25.</b> Filtros de lineamientos mayores a 4000 m .....	61
<b>Figura 26.</b> Dirección de flujo con respecto a la topografía de la zona de estudio. ....	62
<b>Figura 27.</b> Representación visual de la red radial.....	65
<b>Figura 28.</b> Representación visual de red Paralela en la zona de estudio.....	65
<b>Figura 29.</b> representación visual de redes anguladas y desordenadas en la zona de estudio.....	66
<b>Figura 30.</b> Clasificación de la red de drenaje de la zona de estudio basado en clasificación de Way (1978) .....	67
<b>Figura 31.</b> Mapa de clasificación morfométrica según relieve y pendiente del AOI ...	68
<b>Figura 32.</b> Clasificación morfométrica resultante de unificación de unidades según altitud y pendiente .....	69
<b>Figura 33.</b> Esquema de estructuras de la zona de estudio .....	71

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b>	Parámetros morfométricos de la superficie terrestre .....	19
<b>Tabla 2</b>	Clasificación morfométrica de la pendiente según USCG.....	20
<b>Tabla 3</b>	Clasificación de suelos según su potencial agrícola elaborada por el Ministerio de Agricultura de España.....	21
<b>Tabla 4</b>	Clasificación morfométrica de pendientes según Demek (1972) .....	21
<b>Tabla 5</b>	Tipos de relieve y moldura .....	24
<b>Tabla 6</b>	Parámetros del Módulo Line – Catalyst para la extracción automatizada de lineamientos .....	27
<b>Tabla 7.</b>	Coordenadas de la Zona de estudio UTM WGS84 15S.....	38
<b>Tabla 8.</b>	Información de teselas LANDVIEWER .....	41
<b>Tabla 9.</b>	Matriz de elección de evaluación de alternativas de solución .....	42
<b>Tabla 10.</b>	Unificación de valores de clasificación morfométrica .....	50
<b>Tabla 11</b>	Fórmulas de clasificación morfométrica realizada en el álgebra de mapas .....	51
<b>Tabla 12</b>	Parámetros de ajuste del módulo LINE, Catalyst.....	59
<b>Tabla 13.</b>	Parámetros que permiten generar datos válidos en la zona de estudio .....	59
<b>Tabla 14.</b>	Posibles geoformas a encontrar en campo.....	70
<b>Tabla 15.</b>	Estadísticas del análisis de longitud de los lineamientos .....	70

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

Las Islas Galápagos están situadas aproximadamente a 1000 kilómetros al occidente de la costa ecuatoriana (Chadwick, 1991; Geist y otros., 1998). Esta provincia ígnea se originó como resultado de la actividad de un punto caliente tipo “hotspot”, localizado bajo la placa de Nazca, la cual se desplaza en dirección E, a una velocidad aproximada de 51 km/my (Geist y otros., 2014). Como consecuencia de este movimiento, las islas más jóvenes se encuentran al NO (Geist y otros., 2014). El centro de emanación del hotspot es un foco de actividad magmática que está activo desde hace 80 a 90 my (Steinfartz, 2011). Las Galápagos están conformadas por 19 islas volcánicas mayores y 200 islotes, y son reconocidas a nivel internacional por su gran diversidad en la flora y fauna, muchas de las cuales son únicas en el mundo (McBirney y Williams, 1969; Steinfartz, 2011). Son protegidas como Parque Nacional y Reserva Marina por el gobierno de la República del Ecuador, y fue reconocida como Patrimonio Natural de la Humanidad, Reserva de Biosfera y Sitio Ramsar por las naciones Unidas para la Educación, la ciencia y la cultura (UNESCO) en los años 1978, 1984 y 2002 respectivamente. (UNESCO, 2018; Eras-Almeida y otros., 2020)

Por su parte, la isla Santa Cruz posee una altitud aproximada de 864 msnm y con una extensión territorial de 986  $Km^2$  de los cuales el 97% corresponde a territorio del Parque Nacional Galápagos (Auken y otros., 2009). Según el censo poblacional realizado en el año 2022, Santa Cruz tiene una población total de 17.233 habitantes entre el sector urbano y rural de la isla, presentando un incremento del 17,24% a comparación de los resultados del año 2010 en donde se contabilizó un total de 14.263 habitantes (INEC, 2022). Este incremento poblacional plantea desafíos y oportunidades en términos de planificación urbana, gestión de recursos y preservación del entorno natural.

El incremento en el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) a medida que ha avanzado el tiempo ha agilizado el análisis de áreas no accesibles



permitiendo a las organizaciones gubernamentales tomar decisiones más informadas sobre el uso y la gestión de estas áreas. Los SIG permiten a los usuarios recopilar datos geográficos de diferentes fuentes, almacenarlos de forma organizada, analizarlos para identificar patrones y tendencias, y presentarlos de forma visual para facilitar su comprensión (Yilmaz, 2019).

En las Islas Galapagos, en el año 2011 la Universidad San Francisco de Quito en conjunto con la Universidad de Carolina de Norte en Chapel Hill crearon el Centro de Ciencias de Galápagos (GSC), la cual se encuentra en Puerto Baquerizo Moreno-Isla San Cristóbal, con el objetivo de promover la investigación, ciencia y la conservación de las islas, teniendo 5 pilares fundamentales, tales como: cambio ambiental, salud comunitaria y humana, conservación, océanos y biodiversidad (GSC, 2022). Sin embargo, la escasez de información geológica sobre Santa Cruz dificulta la planificación y ejecución de proyectos de desarrollo sostenible en la isla.

El presente estudio se centra en realizar una caracterización morfométrica basado en un modelamiento hidrológico a través de herramientas avanzadas como la telemetría y los sistemas de información geográfica. El propósito principal es generar una información base que resulte valiosa tanto para las autoridades locales, como el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Santa Cruz al momento de tomar decisiones respecto a la planificación urbana y medidas de mitigación para el desarrollo sostenible en la Isla.

## **1.2 Descripción del problema**

Las Islas Galápagos, al constituir un patrimonio natural de la humanidad, y al presentar factores físicos, geográficos, oceanográficos y biológicos hacen que estas sean tan llamativas para los estudios científicos. Sin embargo, la falta de información geológica y geográfica sobre las islas se debe a varios factores, entre ellos su lejanía y dificultad de acceso, la juventud de la investigación geológica en las islas y la limitación de fondos para esta disciplina (Tapia, 2009). Como consecuencia las islas

no constan con una extensa base de datos que pueda agilizar el desarrollo de análisis de diversas organizaciones para la prevención o la conservación de las islas. Esta escasez de información dificulta la identificación de las amenazas naturales y la evaluación de su impacto potencial, así como el aprovechamiento de recursos que posee la isla.

### **1.3 Justificación del Problema**

Una información geológica de calidad en las Islas Galápagos es crucial en múltiples aspectos. Por un lado, eventos como la erupción del volcán La Cumbre ubicado en la isla Fernandina en 2009, aunque no afectaron directamente a la población humana, subrayan la necesidad de datos detallados para evaluar adecuadamente las amenazas y consecuentemente el riesgo para la vida silvestre del archipiélago (Ramón y otros, 2011).

Además, las inundaciones provocadas por fenómenos climáticos, como el evento de El Niño en 1982, evidencian la importancia de comprender la morfología y la geología local para prever áreas vulnerables y tomar medidas preventivas, protegiendo tanto la biodiversidad como a las comunidades locales (Merlen, 2009). La protección de especies emblemáticas, como las tortugas gigantes, se ve obstaculizada por la falta de información geológica precisa, lo que limita la identificación de rutas migratorias y áreas críticas para su conservación. Es así como la escasez de datos geológicos no solo impacta la comprensión de amenazas naturales y fenómenos como erupciones volcánicas e inundaciones, sino que también limita la capacidad para proteger y conservar especies icónicas de las Islas Galápagos, subrayando la importancia de invertir en investigaciones geológicas para salvaguardar este ecosistema único.

El presente proyecto busca proporcionar recursos digitales tales como un mapa que resalte características geomorfológicas/estructurales de la zona de estudio, de tal manera que sean de ayuda al GAD de Santa Cruz para la planificación de obras

públicas, medio ambiente y riesgo geológico, teniendo un enfoque en los siguientes Objetivos de Desarrollo sostenible (ODS):

**Objetivo 1: (Fin de la pobreza)** El proyecto proporciona datos geológicos que pueden ser de ayuda para la planificación de obras públicas, promoviendo el desarrollo económico local y la creación de empleos.

**Objetivo 3: (Salud y bienestar)** El proyecto ofrece información geológica importante para la evaluación y mitigación de riesgos naturales, tales como inundaciones o erupciones volcánicas, protegiendo la salud pública y el bienestar al disminuir la exposición a estos eventos.

**Objetivo 11: (Ciudades y comunidades sostenibles)** El proyecto facilita la toma de decisiones del Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) de Santa Cruz en cuanto a la planificación urbana y la gestión de riesgos.

**Objetivo 13: (Acción por el clima)** El proyecto permite una mejor comprensión de la relación entre la geología local y los fenómenos climáticos, facilitando la adopción de medidas preventivas y estrategias de adaptación frente al cambio climático, protegiendo la biodiversidad y reduciendo los impactos adversos.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

**Realizar** un estudio geomorfológico y estructural **mediante** el análisis de modelos digitales de terreno, **para** evaluar el comportamiento geológico e hidrológico.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Determinar los lineamientos estructurales utilizando metodologías de sensores remotos.
- Caracterizar las estructuras geomorfológicas para futuros análisis geológicos.
- Elaborar una Tabla de análisis de geoformas a para la búsqueda rápida y precisa en campo.

## 1.5 Marco teórico

Se presentan definiciones, técnicas y herramientas esenciales para facilitar una comprensión más completa del desarrollo del presente estudio. En el capítulo 1, se detalla una explicación de las definiciones y métodos esenciales para identificar y categorizar las geoformas, así como también comprender el comportamiento hidrogeológico. Además, se abordan nociones de geomática, detallando las bases del funcionamiento del software a utilizar y su capacidad para reconocer características geográficas.

### 1.5.1 Análisis Hidrológico

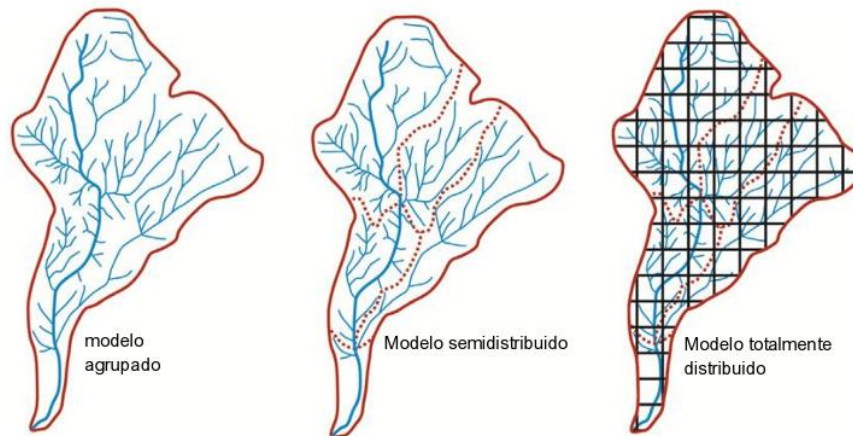
Según Chow y otros (1988), los modelos hidrológicos se basan en tres conceptos principales: manejo de la **aleatoriedad** (determinista o estocástico, si incluyen variables aleatorias), **variación espacial** (agrupado o distribuido, si consideran la variación espacial en la cuenca) y **variación temporal** (flujo estacionario o no estacionario, si consideran cambios en el tiempo).

El presente estudio se basa en el uso de los modelos a partir de la variación espacial, que se clasifica en tres (*ver Figura 1*):

- **Agrupados.**- consideran parámetros espacialmente promediados, a veces reduciéndolos a valores únicos sin dimensiones espaciales.
- **Semidistribuidos.**- tienen en cuenta la variabilidad espacial a nivel de subcuencas.
- **Completamente distribuidos.**- tienen en cuenta la variabilidad espacial al discretizar el dominio espacial en subunidades más pequeñas, como una cuadrícula uniforme, y realizan cálculos en estas subunidades permitiendo analizar la variabilidad espacial en toda la cuenca

### Figura 1

#### Conceptos espaciales de modelos hidrológicos



Nota: tomado de Korres y Schneider (2018)

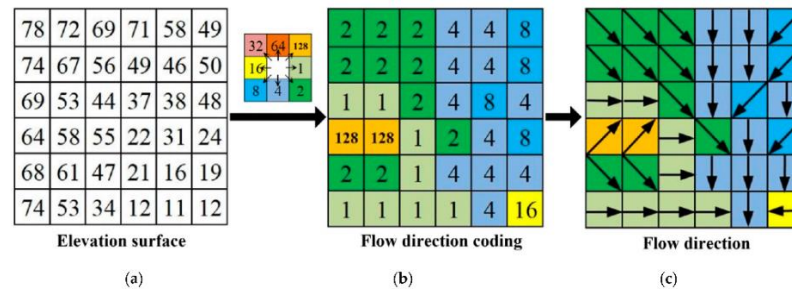
Como se visualiza en la Figura 1, el modelo completamente distribuido se presenta como la opción más idónea para analizar la variación espacial. Esto debido a que el modelo aprovecha datos hidrográficos fundamentales, que proporcionan información detallada sobre corrientes de agua (arroyos, tuberías y canales), cuerpos de agua estancada (lagos, estuarios) y los límites hidrológicos (cuencas, divisores de drenaje y presas). Las características esenciales de una cuenca, incluyendo el almacenamiento de agua y las propiedades de flujo, encuentran su determinación en el relieve (Chow y otros, 1988). Por consiguiente, el análisis topográfico, la definición de la dirección del flujo, la acumulación de flujo y la delimitación de las redes de drenaje representan análisis estándar fundamentados en SIG aplicados a la hidrología.

#### **Dirección de Flujo**

La dirección de flujo es el sentido en la que fluye el agua en una cuenca hidrográfica. En los modelos hidrológicos, se utiliza un modelo digital del terreno para determinar la dirección del flujo de agua en cada celda de la cuenca (Korres y Schneider, 2018). En la Figura 2 se observa la codificación de ArcGIS para asignar las direcciones de flujo.

### Figura 2

Proceso de obtención de la dirección del flujo. a) Superficie de elevación; b) Codificación de la dirección del flujo; c) Dirección del flujo



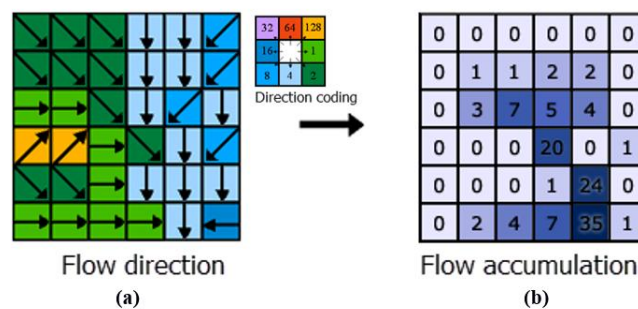
Nota: tomado de Li y otros (2019)

### Acumulación de Flujo

La acumulación de flujo es la cantidad de agua que fluye hacia una celda específica en una cuenca hidrográfica. La acumulación de flujo se calcula sumando la cantidad de agua que fluye hacia una celda desde todas las celdas que la rodean (ver Figura 3) (Korres y Schneider, 2018).

### Figura 3

Proceso de obtención de la acumulación de flujo. a) Dirección del flujo; b) Acumulación del flujo



Nota: tomado de Olusola y otros (2022)

### Red de Drenaje

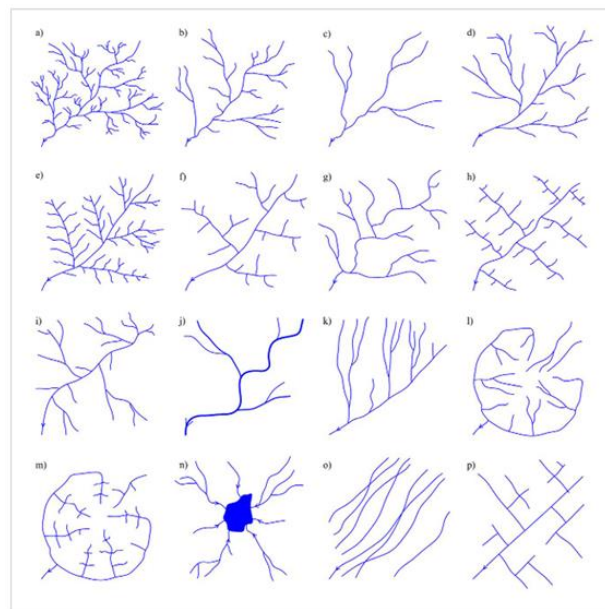
La red de drenaje es un sistema natural de canales y corrientes de agua que se forma en el área de una cuenca hidrográfica (Aguiló y otros, 2014). La configuración de una cuenca reviste gran importancia en los análisis ambientales, ya que genera una variedad de limitaciones y oportunidades. La red de drenaje constituye el conjunto de

ríos y arroyos que atraviesan una cuenca, definiendo la presencia de flujos de agua, procesos erosivos y el transporte de sedimentos (Aguiló y otros, 2014).

Se han llevado a cabo estudios que se enfocan en describir y cuantificar la red de drenaje, siendo uno de los más destacados el realizado por Way en 1978. Este estudio consideró la influencia de factores como la litología, las características del suelo y la topografía, teniendo en cuenta especialmente la permeabilidad del suelo (Aguiló y otros, 2014). Way clasificó la textura del suelo en tres grupos (fina, media, gruesa) y presentó un conjunto de formas de la red de drenaje (*ver Figura 4*). Las cuencas con texturas gruesas indican una escorrentía superficial mínima debido a la presencia de rocas robustas pero permeables, lo que resulta en suelos altamente permeables. Por otro lado, las cuencas de drenaje detrítico se caracterizan por suelos uniformes, típicamente encontrados en áreas con rocas sedimentarias blandas, tobas volcánicas y antiguas llanuras costeras (Aguiló y otros, 2014).

#### **Figura 4**

*Tipos de red de drenaje según su textura y forma.*



*Nota.* tomado de Way (1978). Descripción de cada ítem de la tipología de red de drenaje: a) cuenca de textura fina; b) cuenca de textura media; c) cuenca de textura gruesa; d) cuenca detrítica; e) cuenca pinnada; f) cuenca de drenaje rectangular; g) cuenca de drenaje angulado; h) cuenca de drenaje enrejado; i) cuenca de drenaje

barbado; j) cuenca de drenaje desordenado; k) cuenca de drenaje paralelo; l) cuenca de drenaje radial; m) cuenca de drenaje anular; n) cuenca de drenaje centrípeto; o) cuenca de drenaje trenzado; p) cuenca de drenaje artificial.

### 1.5.2 Análisis Geomorfológico

De acuerdo con Pedraza y otros (1996), para caracterizar el relieve de una zona de estudio se deben tomar en cuenta cuatro enfoques morfométricos: (1) la **morfometría** que representa la evaluación cualitativa y cuantitativa de la estructura del terreno; (2) la **fisiografía** que es la delimitación de las fisonomías basada en sus relaciones con otros elementos en el paisaje; (3) la **morfogénesis** que es el análisis detallado de las interacciones entre las formas del terreno y las influencias de los agentes geodinámicos y (4) la **morfoevolución** que es la identificación de las etapas y secuencias que ha experimentado el relieve hasta alcanzar su configuración actual. A continuación, se proporciona un análisis detallado de cada enfoque morfométrico.

#### **Morfometría**

Los parámetros morfométricos de la superficie terrestre (Land surface parameters - LSP) se pueden analizar de dos formas: localmente, considerando solo el punto exacto en el que se van a calcular o regionalmente, considerando las propiedades geométricas y topológicas del Modelo digital de Elevación (DEM). La elección de parámetros depende del análisis que se desee realizar en la zona de estudio. Algunos de los parámetros más comunes se presentan en la Tabla 1 (Olaya, 2009).

**Tabla 1**

*Parámetros morfométricos de la superficie terrestre*

LSP	Tipo	Descripción
Pendiente*	Local	Tasa de flujo
Orientación*	Local	Dirección de flujo
Curvatura Tangencial*	Local	1er Mecanismo de acumulación
Perfil curvatura*	Local	2do Mecanismo de acumulación
Zona de captación*	Regional	Magnitud de flujo



Hipsometría	Regional	Distribución de valores de altura
Altura de cuenca/Pendiente	Regional	Características de flujo
Insolación	Regional/Local	Intensidad de la irradiación solar directa
Exposición visual	Regional	Extensión del área visible
Rugosidad*	Local	Complejidad del terreno

*Nota:* tomado de (Olaya, 2009). Simbología (\*), hace referencia a parámetros de la superficie a utilizar en el presente proyecto.

La **pendiente** es un factor fundamental para comprender la forma del terreno y se describe como la inclinación de un terreno con respecto a un plano horizontal (Aguiló y otros., 2014). Según Pedraza y otros. (1996) el análisis de la pendiente se puede realizar de modo cuantitativo expresando en valores de porcentaje o en su defecto grados de inclinación ( $0^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ ), y cualitativas en referencia a una expresión textural, es decir, basada en la apariencia visual del terreno (Ej.: plana, ondulada, montañosa, y otras).

La clasificación morfométrica utiliza el valor de la pendiente como unidad de referencia en base a su valor cuantitativo. Una de las clasificaciones morfológica más utilizada es la que fue desarrollada por primera vez por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en la década de 1960 (ver Tabla 2), y se basa en parámetros como la apariencia visual, efectos de la pendiente en el paisaje y las necesidades del usuario, teniendo un enfoque en estudios geomorfológicos y ambientales (Woolley, 1961).

### **Tabla 2**

*Clasificación morfométrica de la pendiente según USCG*

	Morfología	Porcentaje (%)
1.	Plana	0-3
2	Suave	3-8
3.	Moderada	8-15
4.	Fuerte	15-30
5.	Muy fuerte	30-45
6.	Escarpada	>45

En otro contexto, la modificación de la clasificación morfológica del Ministerio de Agricultura de España se sustentó en criterios como la escorrentía, susceptibilidad y condiciones para el empleo de instrumentación agrícola (Aguiló y otros, 2014).

La clasificación adaptada tiene en cuenta las características físicas y prácticas del relieve. Esta clasificación divide las pendientes en los siguientes rangos expresados en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Clasificación de suelos según su potencial agrícola elaborada por el Ministerio de Agricultura de España*

Morfología	Porcentaje (%)
1. Áreas llanas	< 3
2. Áreas con inclinación suave	3-10
3. Áreas con inclinación moderada	10-20
4. Áreas con inclinación fuerte	20-30
5. Áreas con inclinación muy fuerte	40-50
6. Áreas empinadas	> 50

Nota: tomado de (Aguiló y otros., 2014)

Otra clasificación relevante es la establecida por Demek (1972), la cual vincula la forma, los procesos y las actividades predominantes en Europa central. La Tabla 4 presenta una clasificación de la pendiente del terreno basada en esta relación.

**Tabla 4**

*Clasificación morfométrica de pendientes según Demek (1972)*

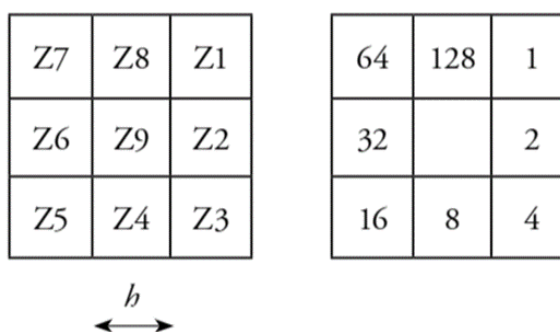
Inclinación	Geoformas predominantes	Fenómenos derivados
0° - 30'	Planicie aluvial, vega, valle aluvial, pampa, sabana	Estabilidad del terreno, pendiente estable, suelo firme, topografía estable, área sin riesgo de deslizamientos
0° 30' – 2°	Llanura ondulada, piedemonte, mesa, tepuy, altiplano.	Flujo periglacial, movimientos de masa lentos, degradación del permafrost, erosión periglacial, soliflucción
2° - 5°	Topografía ondulada, morrena ondulada, valle en forma de U	Inestabilidad del terreno, deslizamiento de tierra, soliflucción, erosión fluvial, erosión laminar
5° - 15°	Valle intra-montaña, valle en V, relieve montañoso	Inestabilidad del terreno, deslizamiento de tierra, soliflucción, erosión fluvial, erosión laminar

15° - 25°	Ladera montañosa, relieve abrupto	Inestabilidad de ladera, erosión superficial, deslizamiento superficial, reptación del suelo, caída de rocas
25° - 35°	Hogback, domo, pared rocosa	Inestabilidad de ladera, erosión superficial, deslizamiento superficial, reptación del suelo, caída de rocas
35° - 55°	Pared rocosa vertical, crestas y acantilados	Erosión extrema, peligro geológico
> 55°	Cornisas y acantilados en calizas, areniscas o similares	Erosión profunda, barranco, cañón, área de alto riesgo geológico.

La **orientación** es una medida de la dirección de una superficie y se define como la proyección de la normal sobre un plano horizontal. Existen varios métodos para calcular el aspecto, entre los que se encuentran: (1) el *método de las superficies bi-cuadráticas* que utiliza una aproximación polinomial para representar la superficie; (2) el *método infográfico*, este método utiliza una técnica de suavizado para calcular el aspecto; (3) el *filtro de Sobel*, que utiliza un filtro de convolución para calcular el aspecto (Aguirre, 2009).

### Figura 5

Numeración convencional para establecer relaciones en un DEM



Nota: tomado de Aguirre (2009)

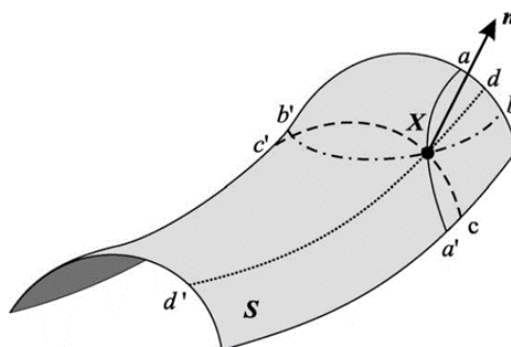
En todos los casos, se toman en cuenta las relaciones existentes entre un píxel y sus ocho vecinos (ver Figura 5). Estas relaciones se utilizan para establecer la dirección de la normal a la superficie.

La **curvatura** es una propiedad bidimensional de una superficie que puede ser medida en diferentes direcciones. Clasificándose en: (1) **Curvatura máxima y mínima**, son medidas de la curvatura en dos direcciones perpendiculares en un punto

dato en una superficie. La *curvatura máxima* es la más pronunciada en cualquier dirección, mientras que la *curvatura mínima* es la menos pronunciada; (2) **Curvatura tangencial**, se refiere a la curvatura en una dirección específica a lo largo de una línea de contorno; (3) **Curvatura de perfil**, se refiere a la forma de la superficie en una dirección en particular (Hart y Sagan, 2007).

### Figura 6

Direcciones de curvatura marcadas naturalmente en la superficie S



*Nota:* tomado de Olaya (2009). Las cuatro direcciones marcadas naturalmente en la superficie S. n – el vector normal a S en el punto X, aa' (curvatura del perfil): la línea de gradiente, bb' (curvatura tangencial): la línea de contorno, dd', cc': las principales secciones normales (curvatura máxima y mínima)

La **rugosidad** es la propiedad inherente de la topografía que mide el grado de irregularidad de una superficie. Se puede medir utilizando una variedad de parámetros, como la desviación estándar de la elevación o el coeficiente de variación de la elevación (Olaya, 2009; Reuter y otros., 2009).

#### 1.5.2.1 Fisiografía

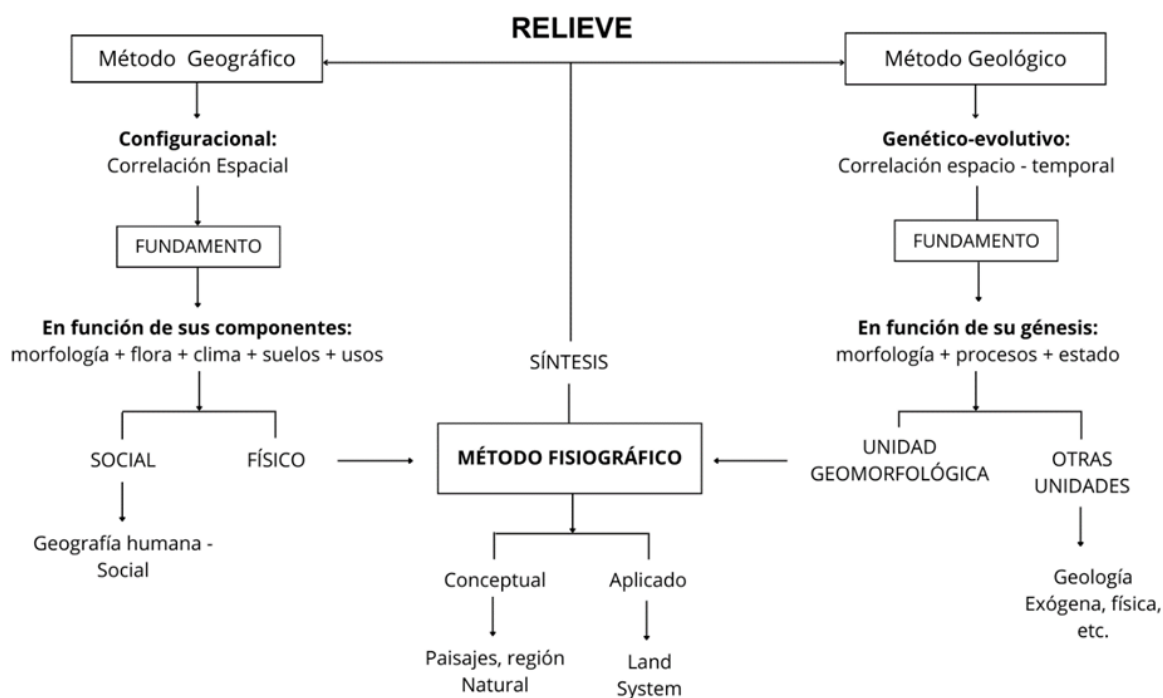
La clasificación fisiográfica es un método de análisis, descripción y calificación de la forma, los procesos y los elementos de la superficie terrestre. Su objetivo es comprender cómo estos factores interactúan para formar el paisaje (Pedraza y otros., 1996). Según Viers (1967) la clasificación fisiográfica se basa en dos conceptos fundamentales: (1) **relieve**, geoforma que resulta de la combinación de la topografía y

la estructura geológica y (2) **modelado**, geoforma determinada por condiciones climáticas o procesos morfogénicos (*Tabla 5*).

Las clasificaciones del relieve se pueden dividir en dos categorías principales: configuracionales y genéticas (*ver Figura 7*). Las clasificaciones configuracionales se basan en la apariencia del relieve, como su altura, extensión o forma. Las clasificaciones genéticas se basan en los procesos que lo han formado, como la erosión, la sedimentación o el levantamiento (Pedraza y otros., 1996).

### Figura 7

Métodos de clasificación del relieve



Nota: Pedraza y otros.,1996 mod.

### Tabla 5

Tipos de relieve y moldura

Estructural	Erosional	Deposicional	Disolucional	Residual
Depresión	Depresión	Depresión	Depresión	Superficie de planación
Mesa	Valle	Canal	Domo	Domo
Cuesta	Cañón (Gorge)	Llanura de inundación	Torre	Inselberg

---

Cresta	Glacis	Llano (por ejemplo, llanura mareal)	Polje	Monadnock
Hogbacks	Mesa	Terraza	Valle ciego	Tors (Cantos rodados)
Barra	Colina (loma)	Mesa	Valle seco	....
Flatiron	Cresta	Abanico	Cañón	
Escarpa	Rafter (chevron)	Glacis	....	
Horst	Cordillera	Bahía		
Anticlinal	Dique	Delta		
Sinclinal	Canal (glacial)	Estuario		
Anticlinal excavado	Circo (glacial)	Marisma		
Sinclinal colgante	...	Arrecife de coral		
Combe		Atolón		
Cordillera		.....		
Cono (domo)				
Dique				
...				

---

*Nota:* tomado de Zinck (2015)

### 1.5.2.2 Morfogénesis

La morfogénesis es el proceso mediante el cual elementos naturales, moldean y configuran la superficie de la Tierra. Estos agentes pueden ser clasificados en dos categorías principales: los *externos* y los *internos*. Los **agentes externos** están vinculados a los elementos climáticos, como la lluvia, el viento, la temperatura, y la acción del agua proveniente de ríos, mares o lagos. Por otro lado, los **agentes internos** se relacionan con la energía que surge desde el interior de la Tierra, impulsando movimientos en la corteza terrestre. En conjunto, estos agentes desencadenan procesos de modelado y cambio en la topografía y la estructura física del planeta a lo largo del tiempo (Pedraza y otros., 1996).

### 1.5.2.3 Morfoevolución

La morfoevolución analiza cómo la forma y la estructura de los organismos, así como las características geológicas del planeta, han evolucionado a lo largo del tiempo debido a la interacción de agentes morfogenéticos y procesos evolutivos. Este campo abarca la comprensión de cómo factores como el clima, la geología, la actividad volcánica y la erosión han influido tanto en la formación y transformación de la

superficie terrestre como en la adaptación y cambio morfológico de las especies, revelando la estrecha relación entre la morfología biológica y los cambios ambientales a lo largo de la historia de la Tierra (Pedraza y otros., 1996).

### **1.5.3 Geomática**

El término “*geomática*” fue creado en la Universidad Laval en Canadá a principios de la década de 1980, es un enfoque integral y multidisciplinario. Se centra en seleccionar herramientas y técnicas para recolectar, almacenar, integrar, analizar y distribuir datos espaciales georreferenciados de múltiples fuentes en formato digital (Gomarasca, 2010).

#### **1.5.3.1 Catalyst/ PCI Geomática**

El software CATALYST de PCI Geomatics, proporciona soluciones flexibles para el análisis y procesamiento de imágenes satelitales, aerofotográficas y de drones. Posee más de 550 algoritmos, otorgando la capacidad de procesar grandes cantidades de datos en tiempos cortos. Permite trabajar con múltiples formatos de archivos, clasificar, analizar y comparar características extraídas de imágenes de manera eficiente. Destaca por ofrecer herramientas para segmentar y clasificar objetos, clasificadores de imágenes avanzados, detección de cambios, extracción de características y correcciones geométricas y radiométricas automatizadas. Los archivos generados son compatibles con ArcGIS, respaldando esta funcionalidad a través de las relaciones comerciales de PCI Geomatics con ESRI Inc (PCI Geomatics, 2020).

#### **1.5.3.2 Catalyst – Modulo LINE**

El módulo LINE de PCI Geomatics identifica y registra entidades lineales de una imagen como polilíneas en una capa vectorial. Diseñado originalmente para imágenes de radar, también es aplicable a imágenes ópticas. Procesa imágenes de 8 bits y si la entrada es de 16 o 32 bits, se ajusta a 8 bits. El resultado es un segmento vectorial con las características lineales detectadas. El proceso consta de tres etapas:

detección de bordes, creación de imagen de bordes binaria y extracción de características lineales. Esto incluye pasos como adelgazamiento, reducción, segmentación y vinculación de curvas (PCI Geomatics, 2020). En la Tabla 6 se presenta los parámetros a evaluar para la extracción automatizada de lineamientos:

**Tabla 6**

*Parámetros del Módulo Line – Catalyst para la extracción automatizada de lineamientos*

Parámetro	Definición	Rango
<b>RADI</b> (Filter radius)	Radio del filtro de detección de bordes (en píxeles). Determina aproximadamente el nivel de detalle más pequeño en la imagen de entrada que se detectará	0 - 8192
<b>GTHR</b> (Gradient threshold)	Umbral para el nivel mínimo de gradiente que debe tener un píxel de borde para obtener una imagen binaria.	0 - 255
<b>LTHR</b> (Length threshold)	Longitud mínima de la curva (en píxeles) que se considerará como lineamiento o para consideración adicional (por ejemplo, vinculación con otras curvas).	0 - 8192
<b>FTHR</b> (Line fitting error threshold)	Error máximo (en píxeles) permitido al ajustar una polilínea a una curva de píxeles. Valores bajos de FTHR proporcionan un ajuste mejor pero también segmentos más cortos en la polilínea	0 - 8192
<b>ATHR</b> (Angular difference threshold)	Ángulo máximo (en grados) entre segmentos de una polilínea. De lo contrario, se divide en dos o más vectores. También es el ángulo máximo entre dos vectores para que se vinculen	0 – 90
<b>DTHR</b> (Linking distance threshold)	Distancia mínima (en píxeles) entre los puntos finales de dos vectores para que se vinculen.	0 - 8192

*Nota: (PCI Geomatics, 2020 mod.)*



## **Capítulo 2**

## 2. Marco geodinámico

En este capítulo se abarcan los procesos que configuran las Islas Galápagos, desde los procesos tectónicos y geológicos hasta los geomorfológicos e hidrológicos. Además, se detalla el área de estudio o área de interés (AOI) del presente proyecto.

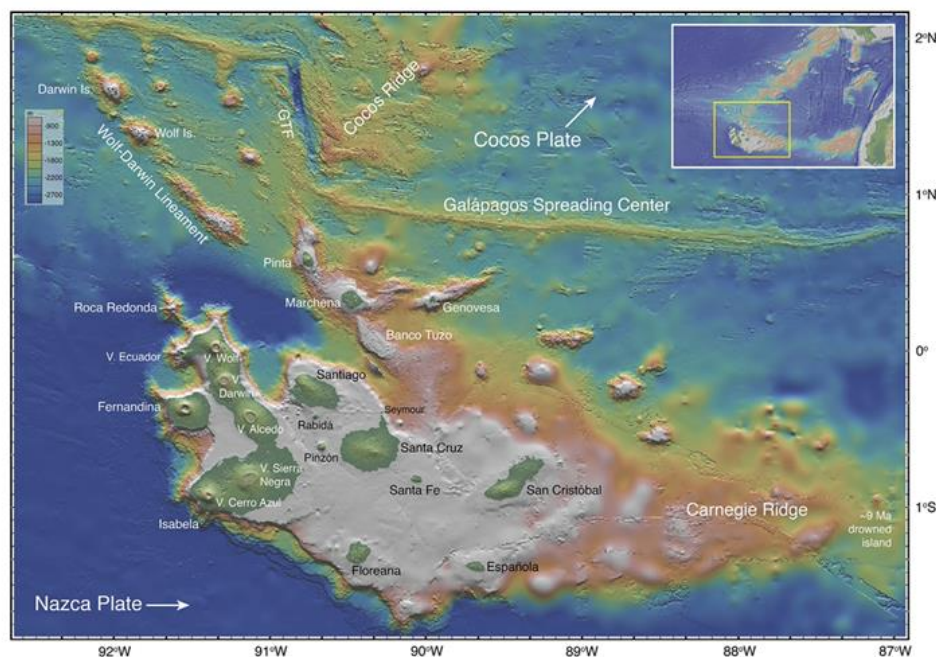
### 2.1 Marco tectónico-estructural

El lecho marino en el Pacífico tropical oriental exhibe pruebas de la presencia de un penacho del manto, conocido como el punto caliente de Galápagos, que ha generado dos cordilleras submarinas sin actividad sísmica, denominadas Cocos y Carnegie (Herbrich y otros, 2016). Estas crestas se extienden hacia las costas de América Central y del Sur, donde se hunden en las trincheras de América Central y Peruana (Harpp y otros, 2014).

Situadas a ambos lados del *Centro de Expansión de Galápagos* (GSC) en dos placas tectónicas separadas, la placa de Cocos al norte y la placa de Nazca al sur, estas placas se desplazan aproximadamente hacia el noreste y el este, respectivamente (*ver Figuras 8*).

### **Figura 8**

*Mapa del Archipiélago de Galápagos*

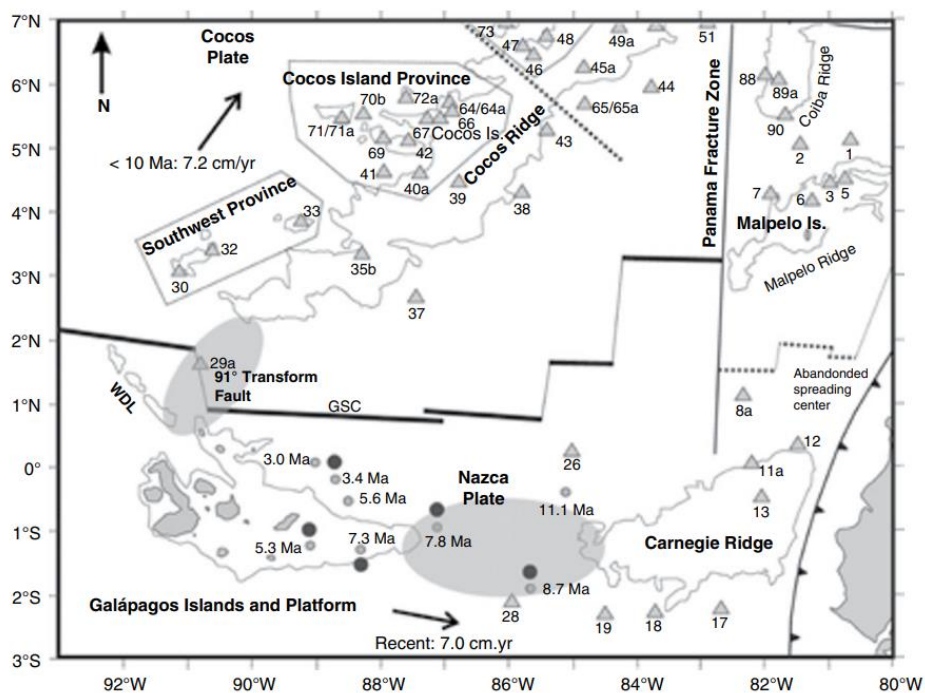


*Nota.* tomado de Harpp y Geist (2021). La plataforma submarina de Galápagos está definida aproximadamente por el contorno batimétrico de 1000 m. Las flechas representan las direcciones absolutas del movimiento de las placas de Cocos y Nazca.

Estas placas se formaron a partir de los restos de la antigua placa de Farallón hace aproximadamente 24 y 23 Ma (Meschede y otros., 1998; Smith, 2007), la cual quedó atrapada entre la Placa del Pacífico, la Placa del Caribe y, más tarde, el continente centro/sudamericano. Las dos crestas consisten en islas, montes submarinos y acumulaciones de lava del punto caliente que varían significativamente en altura desde el fondo del océano. Sinton y otros. (1996) han demostrado que las edades de los montes submarinos en la cresta Carnegie son progresivamente más antiguas hacia el este de los 92° Oeste (*ver Figura 9*), respaldando la noción de la existencia de un penacho estacionario del manto, el punto caliente de Galápagos, cerca de esa ubicación y que el desplazamiento de las placas ha llevado sus productos basálticos en dirección al movimiento de la placa.

### Figura 9

*Edades de las Islas Galápagos aumentan linealmente de oeste a este*



*Nota:* tomado de Harpp y otros (2014)

El desplazamiento de la Placa de Nazca, en un marco de referencia sin rotación neta, es de 5,2 cm/año hacia el este (Harpp y Geist, 2021). Esta placa se subduce bajo la placa Sudamericana, que se mueve hacia el oeste a aproximadamente 0,9 cm anualmente. Por consiguiente, la velocidad de acercamiento entre ambas placas es de aproximadamente 6,1 cm/año (Harpp y Geist, 2021). Según las fechas de los montes submarinos obtenidas por Sinton y otros (1996) esta velocidad pudo haber sido mayor antes de los 9 millones de años, cuando la relación distancia/tiempo cambió debido a modificaciones en la geometría de las placas.

Las dataciones de rocas de las crestas indican que hace aproximadamente entre 22 y 20 millones de años, el punto caliente de Galápagos inició la formación de las Crestas Cocos y Carnegie (Anderson y otros, 2018). Richards y otros (1989) ha relacionado la actividad del punto caliente de Galápagos con basaltos de inundación en el área del Caribe hace 80-90 millones de años, sugiriendo que la actividad del punto caliente y la formación de islas podrían ser extremadamente antiguas. Sin embargo, los movimientos de las placas, el cierre del Estrecho Centroamericano con la formación del istmo centroamericano y las trincheras de subducción en la costa occidental, han eliminado la conexión continua y otras islas de las crestas que podrían haberse formado antes del Oligoceno tardío.

Durante los últimos 10 millones de años aproximadamente, el punto caliente ha alimentado la formación de la parte occidental de la cresta Carnegie y la plataforma de Galápagos en forma de cuña junto con las islas sobre ella. Las islas Wolf y Darwin, las más septentrionales del grupo, son el resultado de la actividad volcánica a lo largo de una falla transversal en el GSC (Harpp y Geist, 2021). En la actualidad, la parte occidental de la plataforma se sitúa sobre el centro del punto caliente, donde se encuentran las islas más activamente volcánicas, Isabela y Fernandina, aproximadamente a  $91^{\circ} 35'$  Oeste.

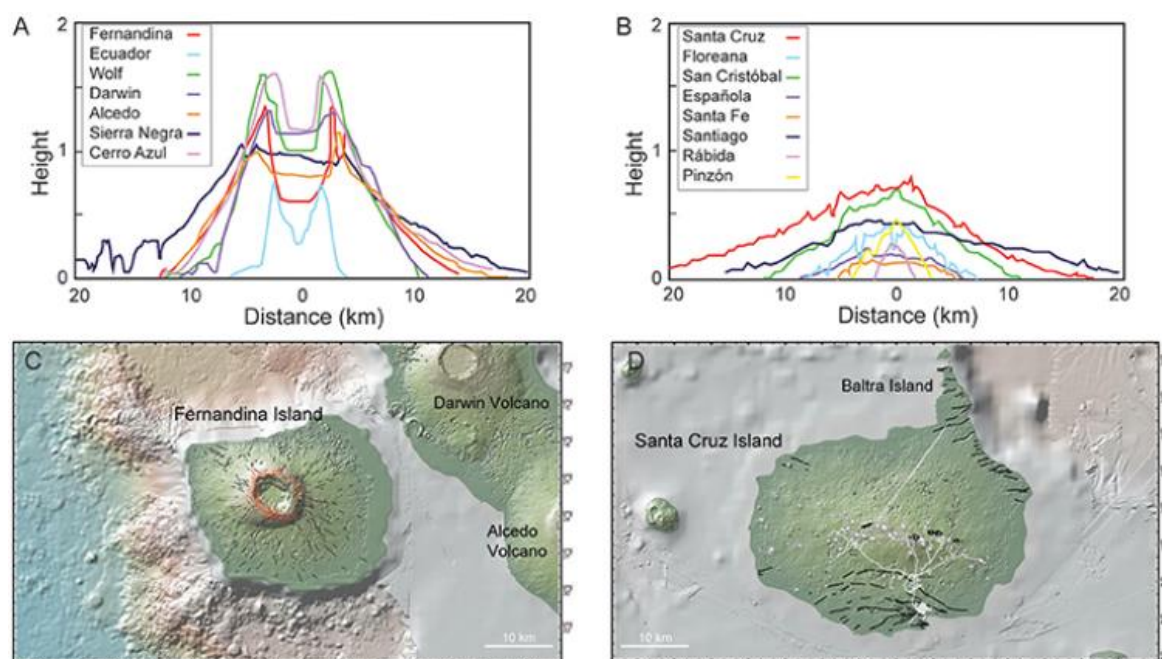
## 2.2 Geología

### 2.2.1 Geología Regional

Teniendo en cuenta la ubicación de las Islas Galápagos con respecto a su punto caliente y el movimiento de la placa de Nazca hacia el este, se encuentran diferencias en las edades, geomorfología, petrología y geoquímica de los volcanes (Sinton y otros., 1996). Los volcanes al oeste son tipo escudo - calderas, son más jóvenes, de mayor altitud y más escarpados, comparados con los volcanes al este con laderas más suaves (Geist y otros., 2002). Entre los volcanes a escudo de las Islas Galápagos occidentales (Fernandina e Isabela) se distinguen dos grupos morfológicos (ver Figura 10). El primero se compone de calderas con profundidades de 40% a 60% de la altura del volcán, con pendientes máximas de más de 20°, a elevaciones de entre el 60 a 80% de altura del volcán y el segundo grupo son calderas más superficiales, con profundidad de menos del 25% de la altura del volcán, con pendientes de menos de 15° hasta el 90% de la altura del volcán (Mouginis-Mark y otros., 1996).

**Figura 10.**

*Clasificación morfológica*

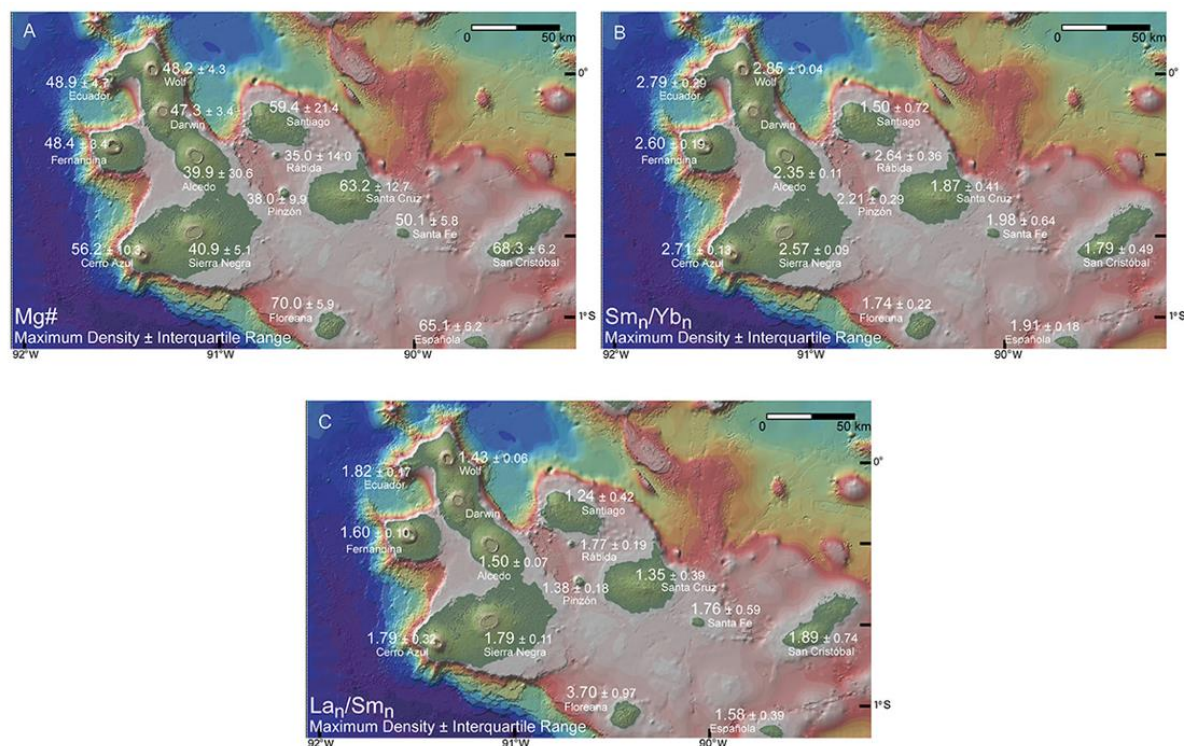


Nota: tomado de Harpp y Geist (2018). (A) Perfiles de volcanes occidentales, prevalencia de calderas en todos los volcanes. (B) Perfiles de volcanes orientales, falta de calderas. (C) Mapa de la isla Fernandina que muestra fallas radiales (negras) y circunferenciales (rojas). (D) Mapa de la isla Santa Cruz que muestra fallas (negro) y conos de ceniza (círculos grises).

Por otro lado, los magmas de las Islas Galápagos presentan una variedad geoquímica (ver Figura 11), resultado de la interacción entre el GSC, el manto superior y el penacho de Galápagos, factores cuyo aporte varía geográficamente. Los volcanes de las islas Galápagos occidentales erupcionan lavas toleíticas mientras que, al este erupcionan lavas de composición desde toleíticas hasta alcalinas (Geist, 1998).

### Figura 11

Mapas de variaciones geoquímicas y petrológicas en los volcanes de Galápagos



Nota. tomado de Harpp y Geist (2018). (A) Distribución de Mg# en los volcanes de Galápagos. Mg# se utiliza como medida de la temperatura magmática y el grado de fraccionamiento superficial. (B) Distribución de variaciones Sm/Yb en los volcanes de Galápagos. Sm/Yb se utiliza como medida de la profundidad de fusión. (C) Distribución

de variaciones La/Sm en los volcanes de Galápagos. La/Sm se utiliza como medida del grado de fusión.

Las Islas Galápagos se destacan de casos más comunes de volcanismos de hotspot como Hawái, debido a la presencia de varios volcanes activos, además de su diferencias petrográficas y morfológicas (Pryet, 2011). Acorde con la historia en 1835, Charles Darwin realizó las primeras observaciones geológicas de las islas, las cuales fueron publicadas en su libro "*The voyage of the beagle*" (1960). Sin embargo, el primer estudio geológico a detalle del archipiélago fue publicado por McBirney y Williams en su libro "*Geology of Galapagos islands*" (1969).

McBirney y Williams (1969), dividieron el archipiélago en cuatro subprovincias geológicas:

- La **subprovincia antigua** comprende las islas Española, Santa Fe, Seymour y Baltra. Estas islas son los restos fracturados de antiguos volcanes que estuvieron activos hace 3 millón de años. Estas islas están alineadas en dirección N30°O, es decir, paralelas a la alineación regional de las Galápagos occidentales más jóvenes.
- La **subprovincia central** está compuesta por las islas San Cristóbal, Santa Cruz y Santiago. En estas Islas los volcanes tienen pendientes relativamente suaves, carecen de una caldera y cada uno tiene sistemas alineados de conos monogenéticos.
- La **subprovincia occidental** está formada por los volcanes históricamente activos de las islas Isabela y Fernandina. Estos escudos tienen formas aproximadamente simétricas, pendientes pronunciadas y enormes calderas.
- La **subprovincia septentrional** está compuesta por islas pequeñas aisladas, excepcionalmente diversas en términos petrológicos: Wolf, Darwin, Genovesa, Marchena y Pinta.

### 2.2.2 Geología Local

La isla Santa Cruz es un volcán escudo elíptico con forma de cuenco invertido, que se eleva a 824 msnm (Herrera y otros., 2022). En su cumbre están presentes scoria cones y pit-crater, que se alinean a lo largo de un sistema de fisuras axiales orientado E-O (McBirney y Williams, 1969). La isla está atravesada por una serie de fallas con dirección E-O, que son visibles a lo largo de las costas noreste, este y sur.

La estratigrafía volcánica de Santa Cruz está dividida en dos series: la **“Serie de plataforma”**, (~1.6 y 1.1 Ma) y ocurre principalmente en el noreste de la isla y la **“Serie de escudo”** (~0.7 Ma) y ocurre en el resto de la isla (Wilson y otros, 2022). La serie de plataforma está formada principalmente por lavas basálticas con fenocristales de plagioclasa y olivino, mientras que la serie de escudo está formada por lavas basálticas alcalinas de transición, que son más diversas y pueden incluir lavas africanas (Schwartz y otros., 2022). Las lavas de ambas series no muestran tendencias dominantes, no hay una uniformidad evidente en las lavas de cada serie, lo que indica que los magmas que dieron origen a estas lavas pueden haber experimentado procesos complejos y variados en su formación, incluyendo diferentes grados de fusión parcial y diferentes profundidades dentro del manto terrestre (Wilson y otros, 2022).

El análisis de las lavas de Santa Cruz señala la presencia de dos tendencias significativas en cuanto a las fases eruptivas. Según Wilson y otros (2022), una de estas tendencias muestra un marcado control por el fraccionamiento de clinopiroxeno, posiblemente asociado a condiciones de alta presión y temperatura durante una fase eruptiva específica. En contraste, la otra tendencia evidencia un menor fraccionamiento de este mineral, sugiriendo condiciones menos extremas en términos de temperatura, presión o composición durante otro evento eruptivo (Schwartz y otros., 2022; Wilson y otros., 2022).



### 2.3 Geomorfología

La geofoma predominante en las islas Galápagos son los volcanes tipo escudo. Las alturas del cono son aproximadamente de 1300 m, el diámetro promedio basal es de 25-48 km, el diámetro del cráter es de 3,5-9 km, y las pendientes primarias de construcción de 4° a >25°. La proporción de ancho entre la base y la caldera es de 2,3-4 (ancho basal/ancho caldera). La proporción de área entre la base y la caldera es de 28-51 (área basal/área caldera). La proporción entre el volumen del volcán y el volumen de la caldera es de 16-103 (volumen volcán/volumen caldera) (de Silva y Lindsay, 2015)

McBirney y Williams (1969) describe Santa Cruz en dos partes: los acantilados que se forman alrededor de las costa noreste y noroeste de la isla compuesto de flujos de lava submarinos y tobas intercaladas con calizas fosilíferas y la parte más joven y grande conformada por un ancho escudo de lavas basálticas. El cono tiene forma elipsoidal, angosta en un eje norte-sur (32,18 km) y más amplia en un eje este-oeste (40,23 km). La altura de la cumbre llega a los 0,77-0,72 km, resultando en flancos con pendientes suaves. Se encuentra rodeado por conos parasíticos y de escoria con cráteres bien preservados. Están alineados aproximadamente paralelos a los escarpes de falla alrededor de Academia Bay y fallas presentes en la Isla Santa Fe. El perfil de la isla se asemeja al de Floreana, pero no al de Isabela o Fernandina.

## 2.4 Hidrología

La isla Santa Cruz, se caracteriza por la ausencia de ríos o arroyos permanentes. Esto se debe a su alto grado de fracturación, que favorece la infiltración del agua de lluvia y evita la formación de cursos de agua superficiales (Re y otros, 2023)

Sin embargo, la presencia de microcuencas facilita la acumulación local de agua de lluvia. Estas microcuencas tienen tres características principales (Domínguez, 2011):

- En la **zona alta** de la isla (600-800 msnm), los suelos arcillosos, con permeabilidad relativamente menor, permiten la acumulación temporal de agua y escorrentía superficial.
- En la **zona media** de la isla (200-600 msnm.), las laderas menos pronunciadas con discontinuidades y fracturas en las rocas favorecen la infiltración de aguas pluviales.
- En la **parte baja** de la isla (0-200 msnm.), la escorrentía superficial es casi nula, ya que el componente arcilloso es bajo, mientras que la fracturación es muy alta y la presencia de fracturas costeras abiertas, grietas y túnel de lava aumenta el flujo hacia el océano.

## 2.5 Zona de estudio

La zona de estudio está situada en las Islas Galápagos, al SE de la Isla Santa Cruz, abarcando la zona urbana que incluye la localidad de Puerto Ayora y Bellavista, se extiende sobre una superficie de ~222 km<sup>2</sup> (*ver figura 12*). Las coordenadas que establecen los límites de la zona de estudio se detallan en la *tabla 7*, utilizando el sistema de coordenadas UTM WGS 1984 Zona 15S.

Cabe recalcar que el área de estudio se enfoca sobre la zona urbana más extensa de la Isla Santa Cruz de tal manera que ayude a realizar el análisis de impacto que existe sobre la comunidad residente en la isla.

Puerto Ayora y Bellavista, siendo los centros más grandes de la Isla Santa Cruz, enfrentan desafíos debido a la creciente urbanización, el turismo y la interacción humana con el ecosistema insular.

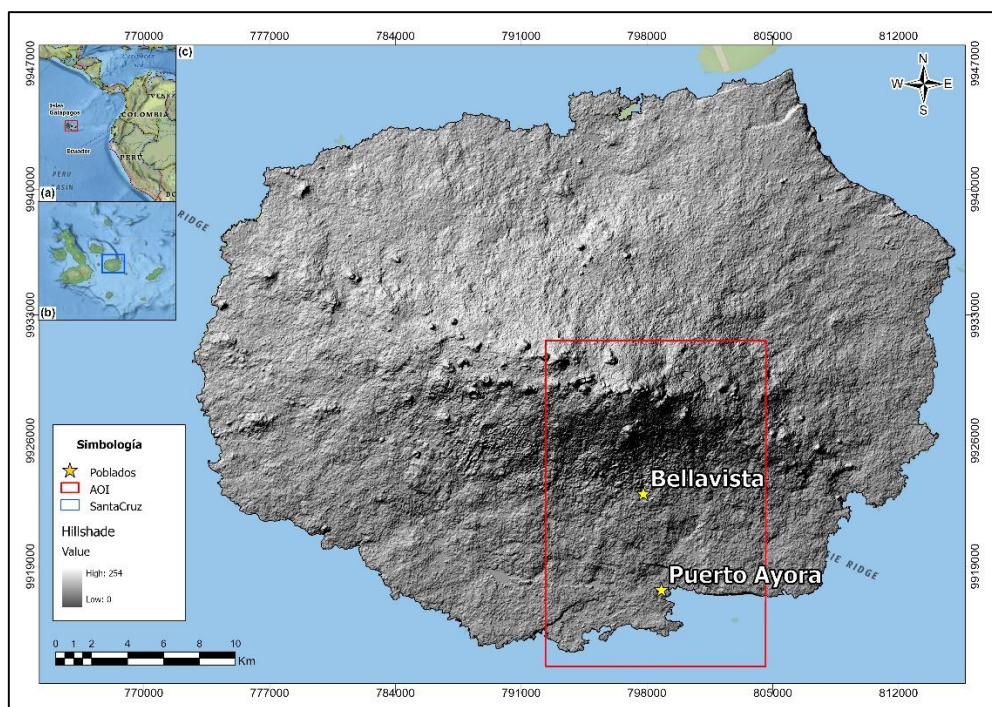
**Tabla 7.**

*Coordenadas de la Zona de estudio UTM WGS84 15S*

Punto	X [m]	Y[m]
1	792360	9931571
2	804618	9931563
3	804606	9913435
4	792348	9913442

**Figura 12.**

*Área de estudio. (a) Territorio de las Islas Galapagos a nivel nacional, (b) Archipiélago de Galápagos - Isla Santa Cruz, (c) Área de estudio del proyecto.*



## Capítulo 3

### 3. Datos y métodos

En este capítulo, se expone la información empleada en el desarrollo del proyecto, junto con una descripción completa de la metodología utilizada. Se ofrece un análisis detallado del esquema geomorfológico, del esquema de estructuras y del modelo hidrogeológico. Cada etapa se ilustra mediante un diagrama con el propósito de facilitar la comprensión del lector.

#### 3.1 Recursos digitales

En la región de estudio, se dispone con información cartográfica base, como mapas, datos recopilados y otros recursos cartográficos. Estos elementos se describen a continuación:

- **Mapas base** en extensión shapefile (shp.) y PDF.
  - a) **Hoja geomorfológica**
    - *Hoja geomorfológica* Islas Galapagos [Santa Cruz – Baltra – Santiago – Rábida – Pinzón] (Hoja N° 4) – escala 1:100000.
  - b) **Cartografía base** de Libre acceso de las Islas Galapagos disponible a escala 1:50000 del IGM (extensión shp.)
    - *Información Base de ríos, vías, población, zonas edificadas, canteras, entre otros.*
  - c) **Modelo digital de elevación (DEM) Landviewer** de resolución espacial 4.7 m obtenido de la plataforma de acceso público LANDVIEWER. Se necesitaron 250 teselas para cubrir Santa Cruz y 80 para cubrir la zona de interés (*ver tabla 8*), se realizó la unión de raster a través de un mosaico y posteriormente se delimito la zona de estudio y se obtuvo un DEM final para el desarrollo de los diferentes análisis.

**Tabla 8.***Información de teselas LANDVIEWER*

Característica	Descripción
Fecha de Adquisición	2-agosto-2023
Cantidad	250
Tamaño de Celda	4,7
Formato	.tiff
Sistema de Coordenadas	Proyectadas WGS 1984 Web Mercator (auxiliary sphere)

### 3.2 Fase de Diseño

Para el análisis de obtención de información del área de estudio, se plantearon 3 alternativas de solución: (1) recolección de datos en campo, (2) uso de sistemas de información geográfica y (3) la revisión de datos históricos (mapas) de Santa Cruz.

La búsqueda de información geológica en Santa Cruz se puede abarcar de tres alternativas distintas, cada una con sus propios matices y desafíos. **La recolección de datos en campo** involucra una presencia directa en el terreno, permitiendo una adquisición primaria de información. No obstante, este enfoque conlleva riesgos logísticos considerables debido a las dificultades de acceso y las posibles limitaciones de tiempo, además de requerir inversiones considerables en recursos humanos y financieros. A pesar de ello, su potencial para datos precisos y representativos es innegable, ofreciendo una visión detallada del terreno geológico.

Por otro lado, **la revisión de datos históricos**, especialmente mapas antiguos, proporcionan una visión retrospectiva valiosa de la geología pasada de Santa Cruz. Sin embargo, la antigüedad de estos datos y su falta de actualización a los cambios actuales en el terreno plantean sesgos significativos. Además, la interpretación precisa de estos datos requiere un cuidadoso análisis contextual para evitar conclusiones erróneas debido a limitaciones temporales o cambios no registrados.

**Los sistemas de información geográfica (SIG)** emergen como una opción altamente ventajosa debido a su capacidad para integrar y analizar una amplia gama de datos geoespaciales con eficiencia y precisión. Su capacidad para generar modelos detallados y visualizaciones dinámicas permite un análisis exhaustivo de la información geológica sin la necesidad de una presencia física extensiva en el campo. La accesibilidad a datos actualizados y la flexibilidad para realizar análisis complejos hacen que los SIG sean una herramienta invaluable para comprender la topografía de Santa Cruz. Además, su potencial para realizar proyecciones y modelados permite anticipar cambios futuros en el paisaje geológico, convirtiéndolos en la opción más eficaz para abordar la obtención de información geológica en la región.

En la Tabla 9 se muestra la matriz de apoyo para la elección de alternativa de diseño más idónea acorde con las necesidades del proyecto:

**Tabla 9.**

*Matriz de elección de evaluación de alternativas de solución*

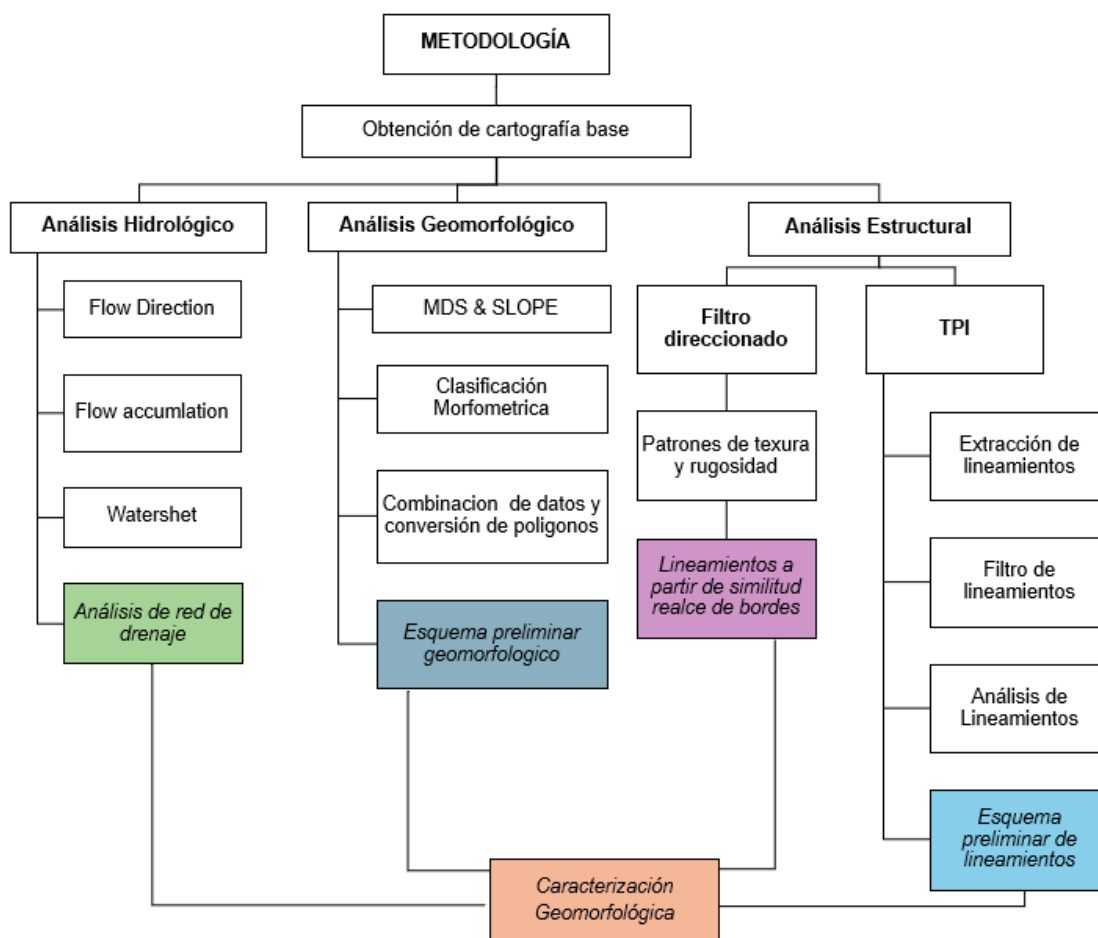
Alternativas parámetros de análisis	Recolección de datos en campo	Revisión de datos históricos	Aplicación de sistemas de información geográfica (SIG)
Precisión de datos	Si	No	Si
Conlleva riesgos logísticos y limitaciones de acceso	Si	No	Si
Permite actualización y anticipación de cambios geológicos	Si	No	Si
Nivel de inversión en recursos humanos y financieros mínimo o nulo	No	Si	Si
Capacidad de análisis y modelado geológico	Si	No	Si
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>5</b>

### 3.3 Metodología

Los procesos llevados a cabo durante la ejecución del proyecto se encuentran explicados de manera detallada en cada sección del respectivo análisis para una mejor comprensión del lector. A continuación, en la Figura 13 se proporciona una guía metodológica detallada que abarca los procesos esenciales para realizar la caracterización morfológica de las áreas de estudio. Esta metodología se inicia con el uso del Modelo Digital de Elevación (DEM), a partir del cual se derivan cuatro archivos fundamentales que enriquecen y completan la caracterización morfológica.

**Figura 13.**

*Guía de metodología general del proyecto*



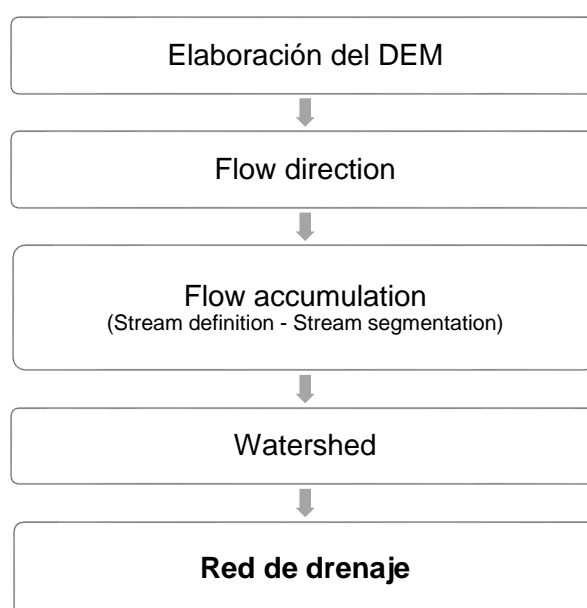


### 3.3.1 Análisis hidrológico

El diagrama de flujo representado en la Figura 14 ilustra el procedimiento empleado para derivar la red de drenaje utilizando el software ESRI ArcGIS Pro versión 3.3. El objetivo principal es la caracterización de la zona de análisis basada en la tipología de su red de drenaje, proporcionando así un punto de partida para la interpretación de los materiales presentes en dicha área.

**Figura 14.**

*Flujo metodológico del análisis hidrológico para obtener la red de drenaje del AOI.*



#### **Generación del MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM)**

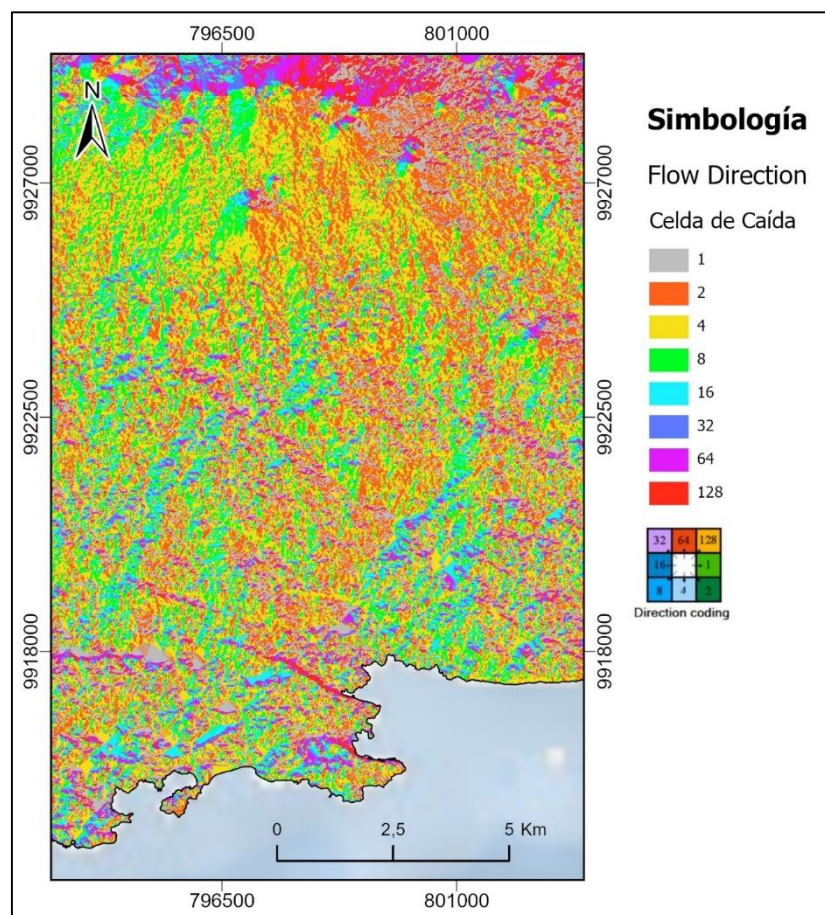
Para realizar el DEM, se utilizaron 80 teselas de la plataforma LANDVIEWER. Los post-procesos que se realizaron para la generación del DEM final se desarrollaron en la caja de herramientas “*Spatial Analysis Tools*”. Luego se elaboró el DEM utilizando “*Raster Functions*” seguido de “*Mosaic Rasters*” y agregando las teselas adquiridas, conservando su tamaño de celda original (4.7 m), debido a limitaciones de capacidad y medios para procesar la información.

## Flow Direction

Una vez obtenido el DEM, se procede a trabajar en la caja de herramientas del módulo *Spatial Analysis Tools > Hydrology > Fill*, esto con la finalidad de rellenar vacíos en la superficie del raster, eliminando los posibles errores del DEM. Luego para determinar la dirección en la que el agua fluirá en una celda dada se selecciona la opción *Flow direction* (ver Figura 15).

**Figura 15.**

*Dirección de Flujo en el sector estudiado.*



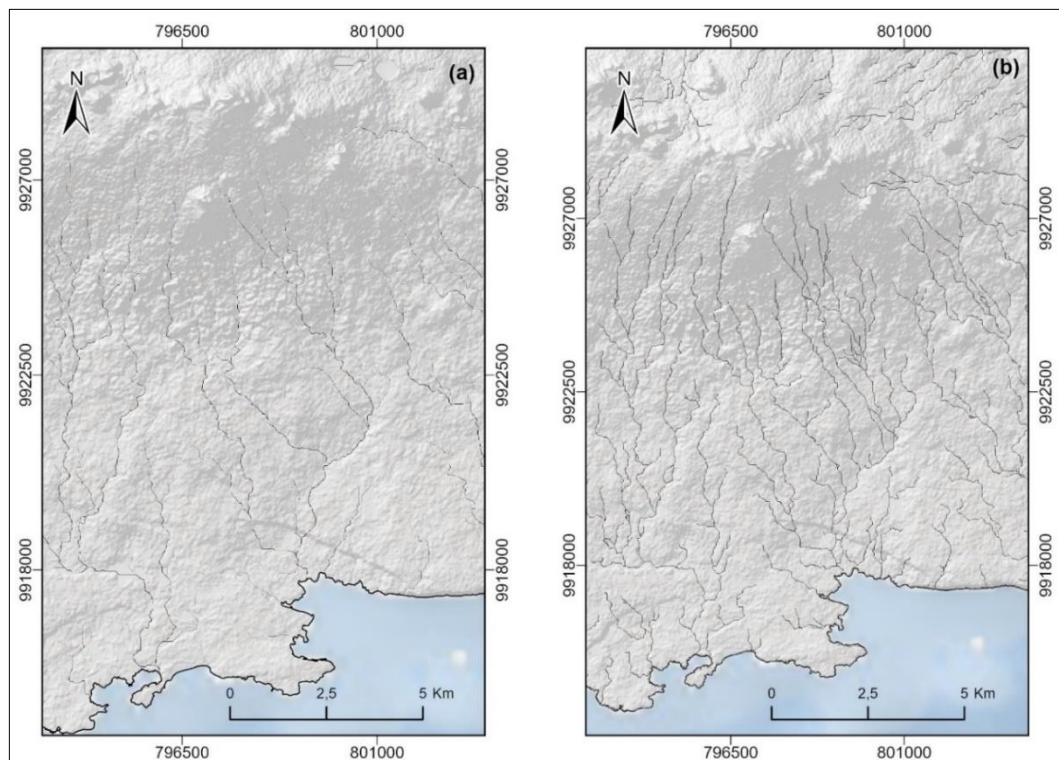
## Flow accumulation

Una vez que se ha determinado la dirección del flujo, el siguiente paso es calcular el flujo acumulado. Esto representa el flujo total para cada celda, determinado por la suma de los pesos de todas las celdas que fluyen hacia cada celda con pendiente descendente; en esta opción el raster de entrada es la dirección de flujo (ver

Figura 15). De este proceso inicial solo obtenemos la red de acumulación principal (ver Figura 16a), sin embargo, para obtener la red principal y secundaria (ver Figura 16b) se ejecuta “Stream Definition” (raster de entrada Flow Accumulation), seguido de “Stream Segmentation” (raster de entrada Stream Definition).

**Figura 16.**

Acumulación de flujos (a) red de acumulación principal de cada celda del AOI, (b) red de acumulación principal y secundaria.



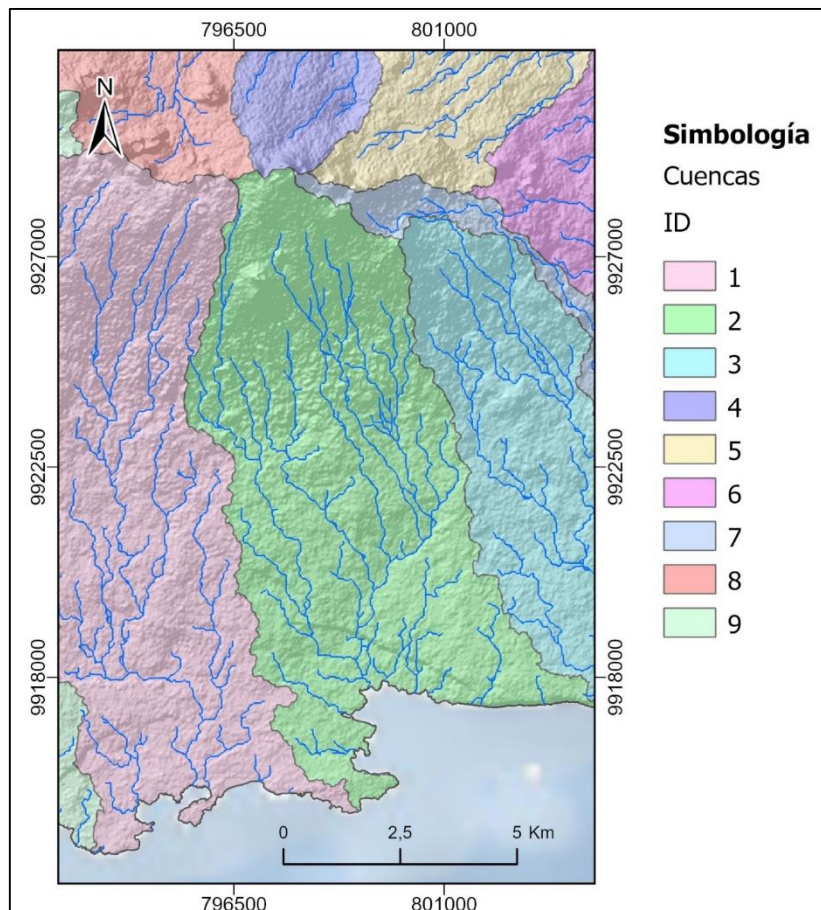
**3.3.1.1 Watershed**

El análisis de watershed en ArcGIS es una técnica que identifica las líneas divisorias de aguas en un terreno (ver Figura 17), delineando las áreas de contribución de agua a puntos específicos en un paisaje. El raster de salida es una cuenca hidrográfica, es decir, las áreas que drenan hacia un punto específico en el paisaje. Estos puntos de drenaje son extraídos de manera automática o manual mediante herramientas del módulo *Arc Hidro* - “*Drainage point processing*”. Este análisis tiene un enfoque subjetivo ya que la cuenca considerada en un punto podría

ser una microcuenca que necesita integrarse a una visión más amplia, por lo que se debe seleccionar el punto en el cursor principal de agua identificado en la línea de drenaje principal.

**Figura 17.**

*Cuencas que configuran la red de drenaje de la zona de estudio*



### **Análisis de la Red de drenaje**

El análisis de la red de drenaje se realizó usando la tipología propuesta por Way (1978), la cual permite identificar y comprender los posibles materiales presentes y asociarlos con geformas en la zona de interés. Esta clasificación es esencial para caracterizar el paisaje, ya que ofrece pistas sobre la formación de diversas geformas como valles, laderas o terrazas fluviales. Comprender la presencia y distribución de estos materiales es fundamental para entender la morfología del terreno, desde la

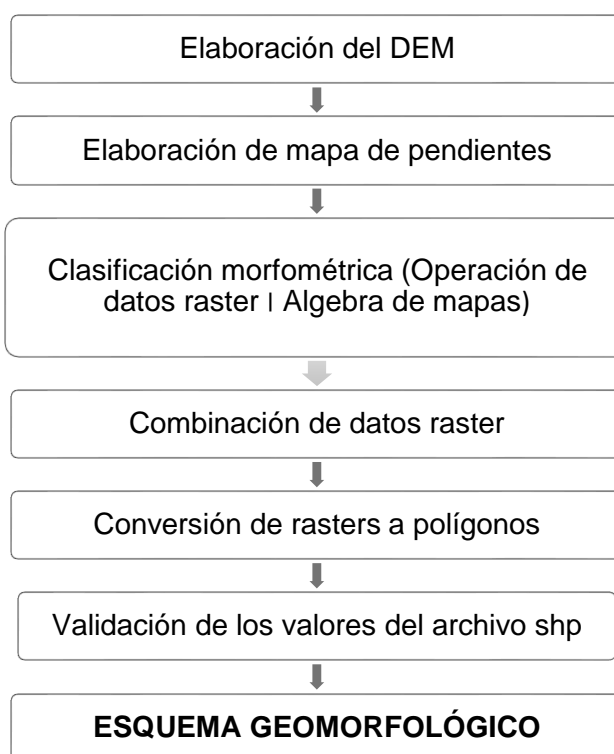
evaluación de riesgos naturales hasta la planificación de proyectos de infraestructura y conservación ambiental.

### 3.3.2 Análisis geomorfológico

En la Figura 18 se muestra el diagrama del proceso de análisis geomorfológico. Este proceso empieza con la generación del Modelo Digital de elevación (DEM) y la derivación del Mapa de Pendientes (Slope) a partir de este modelo. Luego, se procede a una clasificación morfométrica empleando operaciones de datos raster mediante álgebra de mapas para identificar diferentes atributos del terreno. La integración de estos datos ráster combinados se convierte en polígonos para un análisis espacial detallado. Los datos resultantes son tratados y verificados para garantizar su precisión y consistencia. Finalmente, se sintetizan estos resultados en el mapa geomorfológico, proporcionando una representación visual y descriptiva de las diversas formas y características del terreno en el área de estudio.

#### **Figura 18.**

*Diseño metodológico para la obtención de datos en análisis geomorfológico*

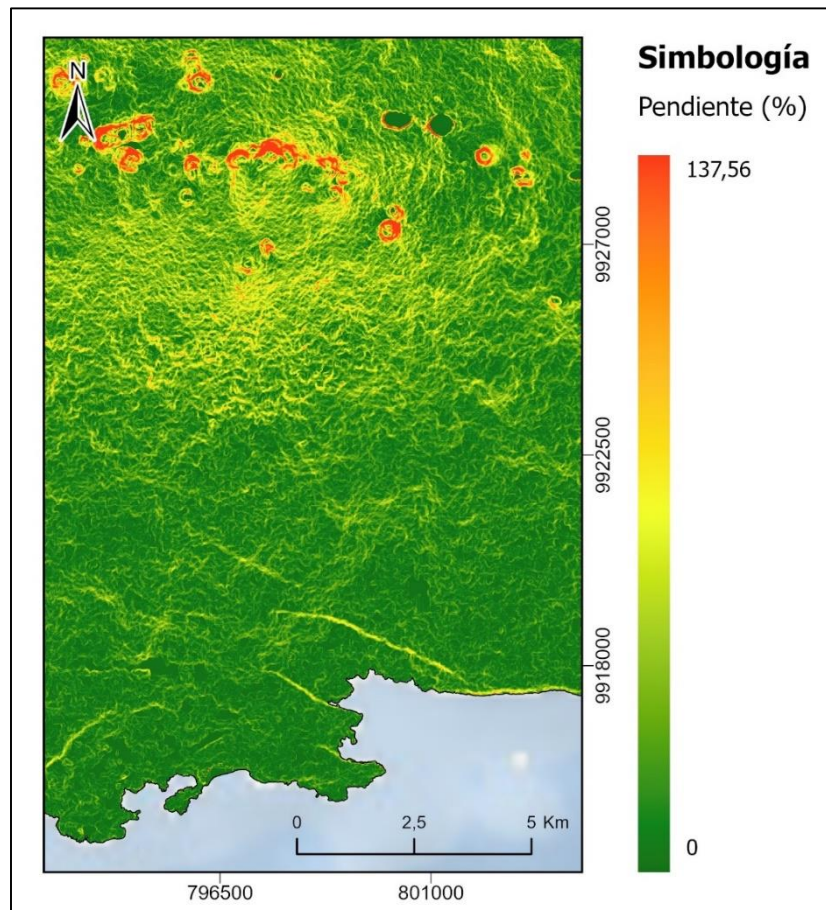


### **Elaboración del Mapa de pendientes**

Para elaborar el mapa de pendiente, se hizo uso de la función “Slope” de “Spatial Analyst Tools”, en esta herramienta el archivo de ingreso es el DEM que se genero previamente. Este elemento facilita reconocer las diferencias de gradientes entres dos formas de relieve lo cual permite observar la conexión entre la elevación y la distancia horizontal entre dos puntos de interés, pudiendo observar el comportamiento del terreno. La unidad de medida de la pendiente es %. (ver Figura 19).

#### **Figura 19.**

*Modelo de Pendiente de la zona de estudio*



#### **3.3.2.1 Clasificación morfométrica**

Para llevar a cabo la clasificación morfométrica, se emplean el DEM y el mapa de pendientes (SLOPE) previamente obtenidos. El SLOPE describe las inclinaciones del terreno, mientras que el DEM representa el modelo digital de elevación que nos

permite analizar la configuración altimétrica del área en cuestión. En la Tabla 10, se presenta la categorización fisiográfica derivada de la clasificación del equipo responsable de geomorfología del Consorcio Tracasa/Nipsia (CTN) y el equipo técnico de SIGTIERRAS (2015) y la clasificación morfométrica de la microcuenca Picuroyacu de Pacco (2010). Esta descripción de geformas según sus grupos genéticos se fundamenta en la relación entre el grado de inclinación y el desnivel de elevación relativa, esta variación se calcula desde un punto de referencia en altura. La elección de este punto debe ser verificada y está condicionada por el área de enfoque y los objetivos específicos de cada estudio o proyecto. En este caso, la altitud de análisis es de 864 metros debido a que el área de estudio no muestra terrenos accidentados con áreas muy elevadas (como en el caso de la región de la sierra en Ecuador), la zona de estudio no requiere una diferencia de altitud significativa, sino la altitud real.

**Tabla 10.**

*Unificación de valores de clasificación morfométrica*

Clase	COD	Sub-Paisaje	Unidad Fisiográfica	Pendiente (%)	Desnivel (m)	Autor
1	TBI	Terraza	Inundable	0 – 4	0 - 80	Pacco
2	TBNI	Baja	No inundable	4 – 8		
3	TM	Terraza Media	-	0 – 15	80 – 300	Pacco
4	TA	Terraza Alta	-	0 – 25	300 - 1000	Pacco
5	L	Lomada/ondulada	-	2 – 25	0 - 50	SIGTIERRAS
6	CBD	Colina Baja	Disectada	5 – 40	5 – 15	SIGTIERRAS
7	CBFD		Fuertemente Disectada	12 – 70	15 – 25	
8	CM	Colinado Medio	-	12 -70	25 – 100	SIGTIERRAS
9	CAD	Colina Alta	Disectada	12 – 100	100 – 200	SIGTIERRAS
10	CAFD		Fuertemente Disectada	12 – 100	200 – 300	
11	M	Montaña	-	12 – 100	>300	SIGTIERRAS

*Nota: Tomado de SIGTIERRAS (2015) y Pacco (2010)*

Una vez completada la clasificación, se avanzó con la identificación de las formas geológicas presentes en el área. Esta identificación se llevó a cabo utilizando

fórmulas que se basan en los datos de pendiente y cambios de altitud (ver Tabla 10). A partir de esta metodología se crearon 11 fórmulas, utilizando como referencia una altitud base de 864 msnm. A este valor se le añadieron los cambios altimétricos correspondientes a cada forma geológica. Estas fórmulas son (ver Tabla 11):

**Tabla 11**

*Fórmulas de clasificación morfométrica realizada en el álgebra de mapas*

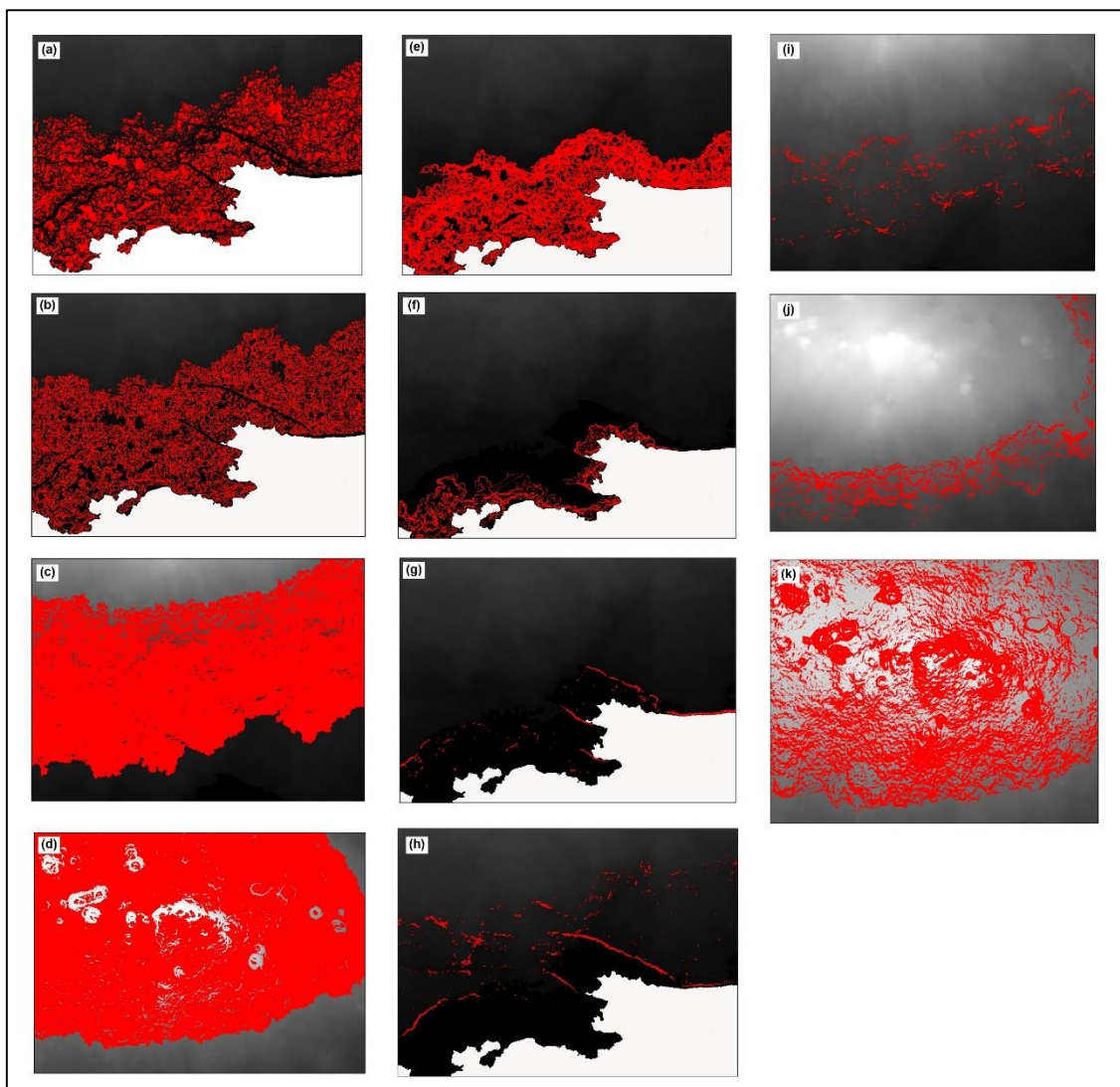
COD	Ecuación
TBI	$(SLOPE \leq 4) \& [DEM \leq 80]$
TBNI	$(SLOPE > 4) \& (SLOPE \leq 8) \& [DEM \leq 80]$
YM	$(SLOPE \leq 15) \& [MDS > 80] \& [DEM \leq 300]$
TA	$(SLOPE \leq 25) \& [MDS > 300] \& [DEM \leq 864]$
L	$(SLOPE > 2) \& (SLOPE \leq 25) \& [DEM \leq 50]$
CBD	$(SLOPE > 5) \& (SLOPE \leq 40) \& [DEM > 5] \& [DEM \leq 15]$
CBFD	$(SLOPE > 12) \& (SLOPE \leq 70) \& [DEM > 15] \& [DEM \leq 25]$
CM	$(SLOPE > 12) \& (SLOPE \leq 70) \& [DEM > 25] \& [DEM \leq 100]$
CAD	$(SLOPE > 12) \& (SLOPE \leq 100) \& [DEM > 100] \& [DEM \leq 200]$
CAFD	$(SLOPE > 12) \& (SLOPE \leq 100) \& [DEM > 200] \& [DEM \leq 300]$
M	$(SLOPE > 12) \& (SLOPE \leq 100) \& [DEM > 300]$

Cada una de estas fórmulas se introduce individualmente en la función “*raster calculator*”. Por cada ecuación, se genera un raster que representa una forma geofoma basada en el tipo de relieve (ver Figura 20). Cada resultado se guarda con un código que lo identifica de manera representativa.



**Figura 20.**

Rasters iniciales de clasificación morfométrica según relieve y elevación de la zona de estudio.



*Nota.* Términos mencionados en la clasificación morfométrica descrita en la Tabla 9:

(1) TBI, (2) TBNI, (3) TM, (4) TA, (5) L, (6) CBD, (7) Cbfd, (8) CM, (9) CAD, (10) CAFD, (11) M.

**Combinación de archivos raster**

Después de la creación de los ráster, estos se fusionan utilizando la función 'combine' de "Spatial Analyst tools", resultando en un único archivo ráster que incluye los 11 productos geomorfológicos detallados anteriormente. Se sigue un orden específico al introducir los ráster para su combinación. Cuando la fusión este

completada, se opta por la función "*cubic Convolution*" en la pestaña de Visualización de propiedades del archivo para suavizar la forma del conjunto resultante.

### ***Conversión de raster a shapefile***

El ráster obtenido se convierte en un shapefile de polígonos utilizando la función "*raster to polygon*". Trabajar en formato shp permite la edición y la determinación de la geometría de los polígonos que describen las formaciones geográficas.

### ***Verificación de valores***

Una vez creado el shapefile que delinea los polígonos representativos de las diferentes geoformas, se lleva a cabo el cálculo del área de cada uno de estos polígonos. A continuación, se procede a depurar aquellos que poseen áreas inferiores a 1 ha utilizando la herramienta "Eliminate". Posteriormente, se introduce un nuevo columna tipo texto en la tabla de atributos del shapefile, Donde se asignan los nombres apropiados a las diversas geoformas identificadas.

Se establece una correspondencia entre el código de cuadrícula de los polígonos y los valores del ráster resultante de la combinación. Esto requiere un análisis para determinar la similitud entre el valor del código de cuadrícula y las formaciones geológicas representadas por los valores del ráster obtenido tras la combinación. Una vez identificado a qué tipo de formación geológica corresponde cada valor del código de cuadrícula, se agrega la abreviatura correspondiente a cada producto geomorfológico a la columna de descripción del shapefile. Luego, se lleva a cabo un proceso de "Dissolve". Finalmente, se presenta visualmente el resultado obtenido de las unidades geomorfológicas mediante la creación de un mapa

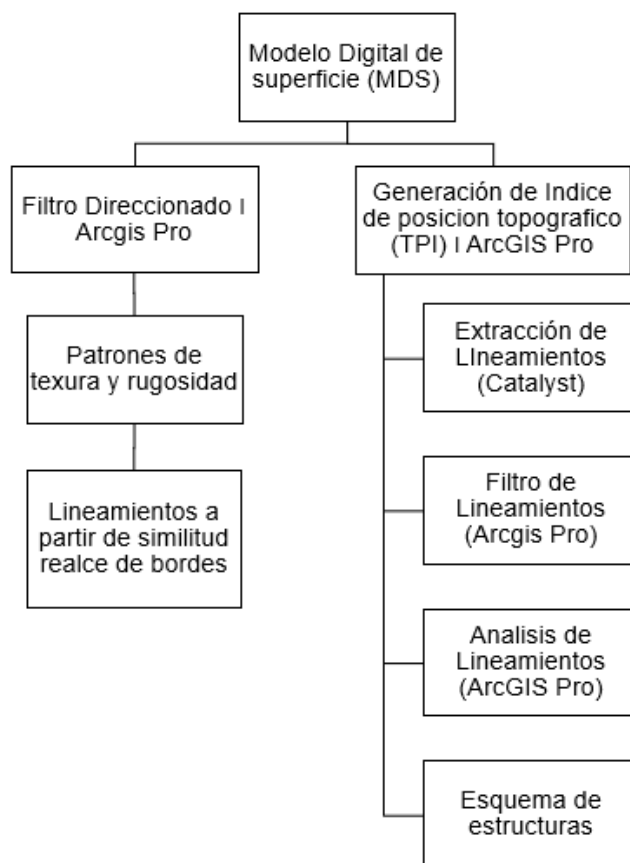
### 3.3.3 Análisis estructural

En el análisis estructural se realiza la identificación lineamientos, delineando las fronteras naturales entre formas de relieve y elementos lineales que revelan estructuras geológicas significativas. Esta metodología, empleando herramientas como DEM y técnicas de cartografía geológica, es esencial para entender configuración del terreno del área de estudio.

Para el análisis de los lineamientos se emplearon dos herramientas distintas: en primer lugar, se utilizó el filtro direccionado, que selecciona patrones consecutivos alineados con la topografía. En segundo lugar, se implementó la extracción de lineamientos mediante la generación de un Índice de Posición Topográfico (TPI). A continuación, en la Figura 21 se describe la metodología de esta sección

**Figura 21.**

*Esquema de Metodología de análisis estructural.*



### **Filtro direccionado**

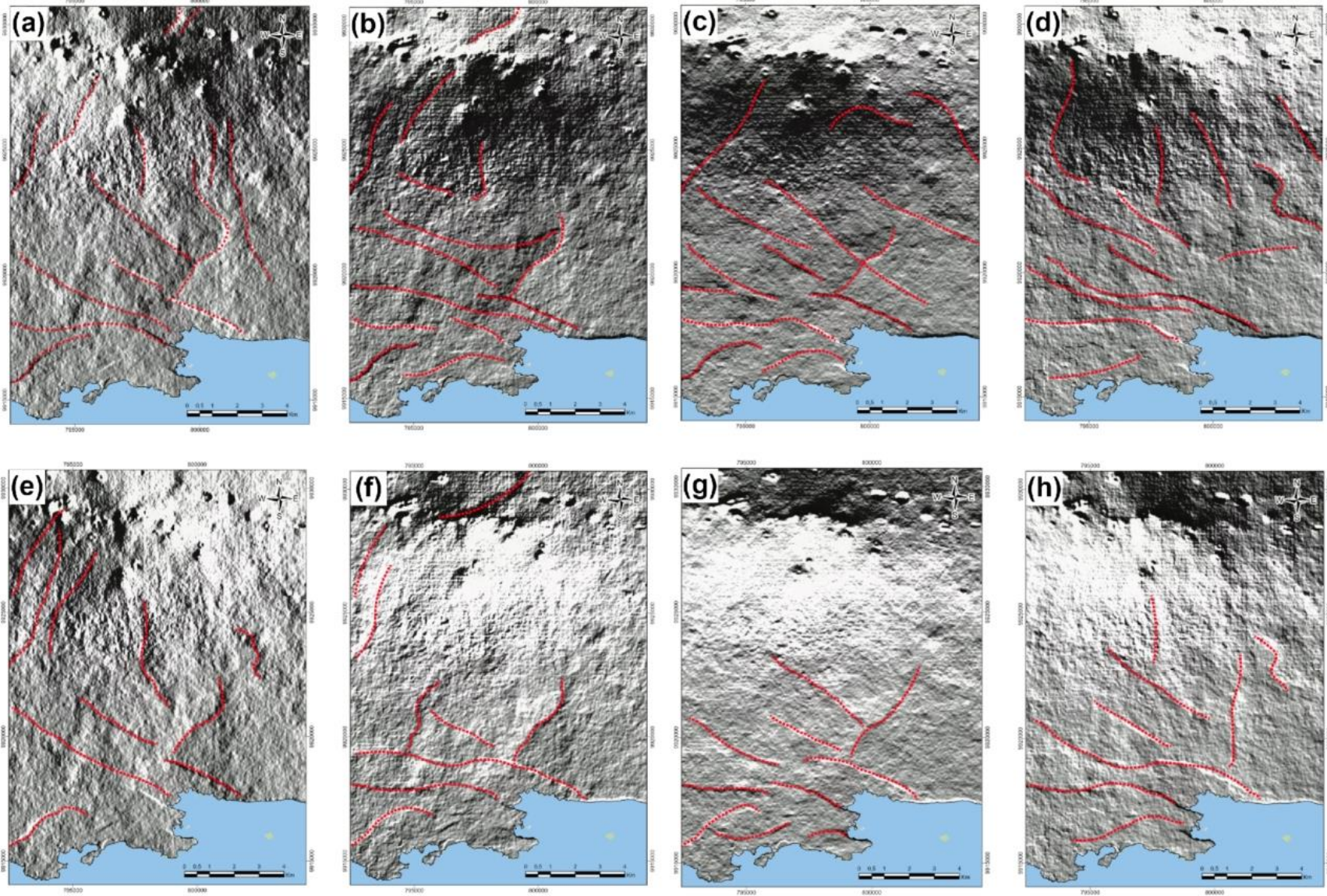
En el software ArcGIS Pro, este proceso se centra en la aplicación de filtros de convolución direccionados que operan en ángulos específicos ( $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ ,  $225^{\circ}$ ,  $270^{\circ}$ ,  $315^{\circ}$ ). Estos filtros se emplean para resaltar características direccionales en una imagen, permitiendo la identificación y realce de bordes, líneas o detalles orientados en esas direcciones particulares. La aplicación de estos filtros tiene como objetivo destacar y acentuar patrones específicos en la imagen, lo cual resulta valioso para la detección de elementos lineales, análisis de texturas y procesamiento destinado a identificar características direccionales en la escena visual.

El análisis de cada imagen de filtro se llevó a cabo inicialmente de manera individual (*ver Figura 22*). Posteriormente, se realizó el análisis de patrones constantes en las parejas de cada ángulo, resultando en combinaciones como 0-180, 45-225, 90-270, 135-315 siguiendo una comparación entre sus resultados. De esta manera, para cada alineamiento constante se lo considero un patrón significativo de lineamiento, se extrajeron los resultados en un layer separado. Esto condujo a la obtención de los lineamientos derivados del realce de bordes constantes en la zona de estudio, facilitando la identificación y visualización de patrones significativos.

Estos filtros direccionados no solo destacan patrones direccionales, sino que también enfatizan las variaciones de textura en el relieve del terreno de la zona de estudio. Este aspecto se convierte en un elemento distintivo fundamental al diferenciar las unidades geomorfológicas. Al resaltar texturas específicas, el proceso facilita la identificación y clasificación de diferentes características del paisaje, contribuyendo así a un análisis más detallado y preciso los cambios geomorfológicos.

**Figura 22.**

Filtros direccionados indicando realces de bordes (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$ , (c)  $90^\circ$ , (d)  $135^\circ$ , (e)  $180^\circ$ , (f)  $225^\circ$ , (g)  $270^\circ$ , (h)  $315^\circ$ .



### ***Fundamento para la creación del Índice de Posición Topográfica (TPI)***

Para la identificación de lineamientos geológicos se hizo uso de un modelo de Índice de Posición Topográfico (TPI), que permitió obtener lineamientos estructurales de forma automatizada, mediante el software CATALYST, seguido de un tratamiento de datos en Sistemas de Información Geográficos (SIG) y finalmente se pudo clasificar los lineamientos obtenidos.

Este trabajo se basará en las propuestas de ocho autores: Das y otros. (2018), Abdullah y otros. (2013), De Oliveira Andrade Filho y otros. (2012), El-Sawy y otros. (2016), Carrillo de la Cruz y otros. (2015), Hashim (2012), Prasad y otros. (2013), y Villalta y otros (2022). Estas propuestas se utilizarán como base para reconocer los lineamientos principales. Se han modificado algunos parámetros respecto a los bibliográficos para contestar a las condiciones de la zona de estudio.

Para identificar y definir los lineamientos, se utilizó el DEM de Landviewer en lugar de las imágenes satelitales LANDSAT recomendadas en la literatura revisada, debido a su mayor resolución espacial de 4.7 metros en contraste a las imágenes Satelitales de Santa Cruz. Esto permite una observación más detallada de la topografía del terreno.

### ***Generación de TPI***

Después de adquirir el Modelo Digital de Elevación (DEM) del área de estudio, se creó el Índice de Posición Topográfica (TPI) en lugar de usar el relieve Hillshade, como lo sugiere Das (2018). Esto se debe a que para el método Hillshade, se requiere la generación de varios modelos en diferentes ángulos de azimut, lo que, según el autor, produce un resultado más preciso. Sin embargo, debido a que el área de estudio está rodeada por altos acantilados y tiene un relieve muy accidentado, usar Hillshade no era una opción práctica en métodos automáticos.

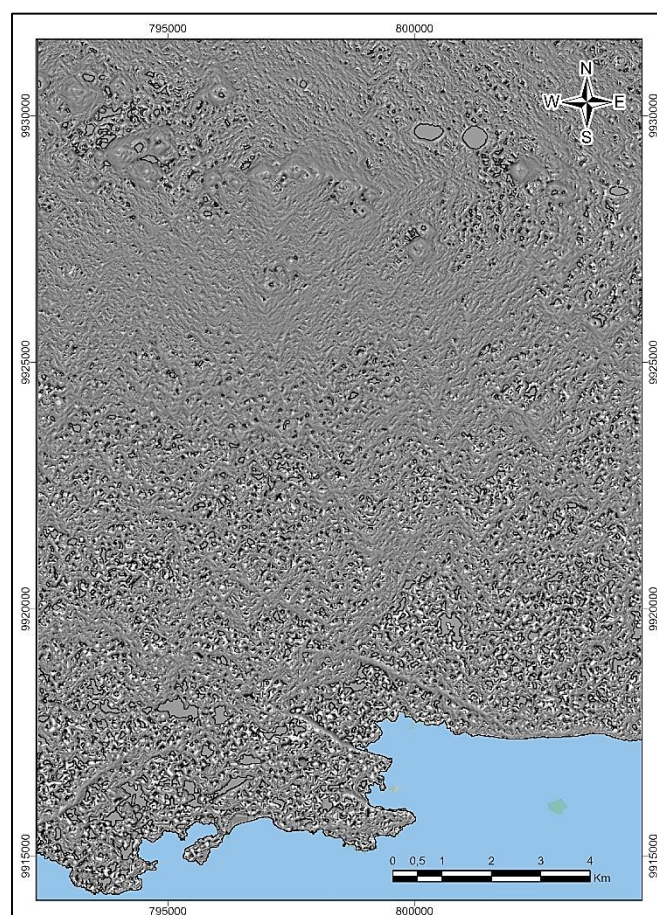
Se obtuvo el TPI mediante al análisis de estadística focal de la herramienta "Focal Statistic" de ArcGIS Pro con tamaño de celda 7x7 y análisis de vecindad tipo

rectangular (ver Figura 10), dado a que esta opción es capaz de representar con mayor detalle las pendientes pronunciadas (ver Figura 23).

El TPI utiliza un análisis de vecindad para calcular la pendiente de la superficie. El tamaño de la celda utilizado en este análisis determina la resolución del TPI. A una resolución alta el TPI proporciona un mayor detalle, mientras que una resolución baja proporciona una visión general (Weiss y otros, 2001).

**Figura 23.**

*Mapa de Índice de posición topográfica (TPI) de la zona de estudio.*



**Extracción de lineamientos**

Una vez generado el TPI, se procedió a la extracción automática de los lineamientos. Para este propósito, se empleó el módulo LINE de una versión de demostración del software CATALYST. La cantidad y longitud de los lineamientos extraídos están determinados por los parámetros de entrada asignados al módulo

LINE (Villalta et al., 2022). El algoritmo implementado en LINE de CATALYST consta de tres fases: detección de bordes, umbralización y extracción de curvas. Los parámetros del algoritmo utilizados en el procesamiento se detallan en la Tabla 11:

**Tabla 12**

*Parámetros de ajuste del módulo LINE, Catalyst*

PARÁMETROS	
RADI	Radio de filtro en pixeles
GTHR	Umbral de gradiente de borde
LTHR	Umbral de la longitud de la curva
FTHR	Umbral de error de ajuste de línea
ATHR	Umbral de diferencia angular
DTHT	Umbral para vincular la distancia

Nota: Tomado de Villalta y otros (2022)

La obtención de los lineamientos se llevó a cabo ajustando los parámetros mencionados previamente. Se crearon tres conjuntos de valores umbral adaptados a la zona de estudio (Tabla 12). A continuación, se presentan los parámetros obtenidos:

**Tabla 13.**

*Parámetros que permiten generar datos válidos en la zona de estudio*

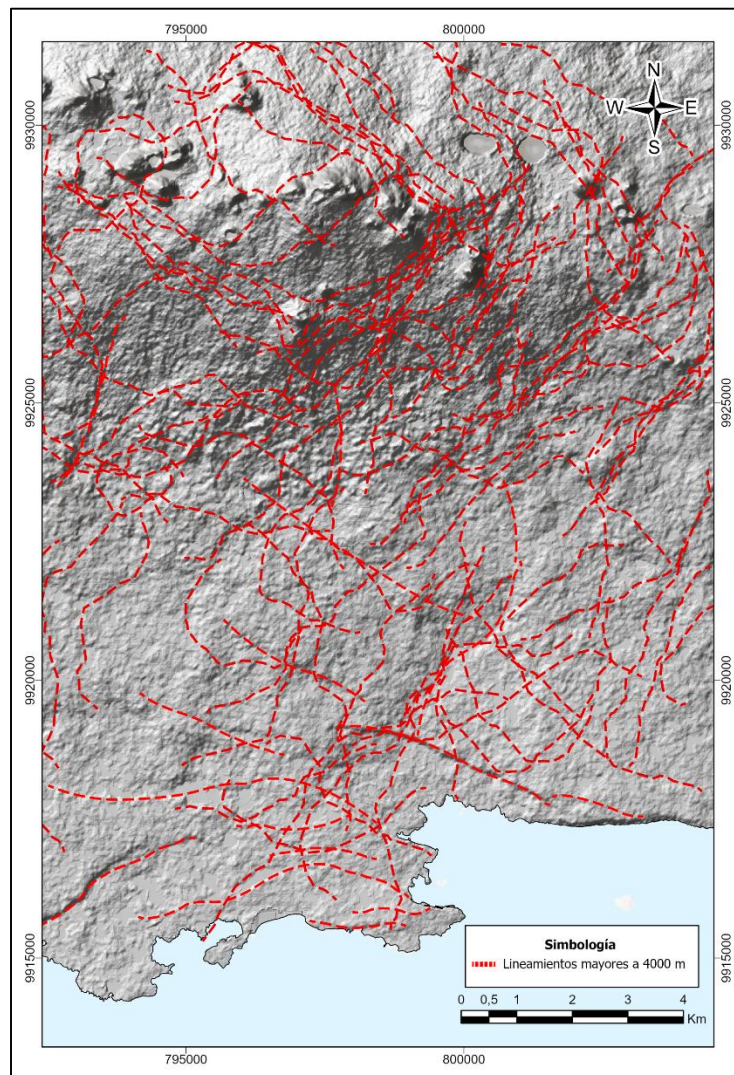
PARÁMETROS	Versión 1	Versión 2	Versión 3
RADI	15	20	15
GTHR	20	25	25
LTHR	50	50	60
FTHR	3	3	3
ATHR	45	45	45
DTHT	50	50	60

A pesar de que los lineamientos derivados de los tres conjuntos de parámetros se adaptaban a la zona de estudio, se optó por seleccionar los lineamientos generados con los parámetros de la versión 2 (Tabla 12). Esto se debió a la observación de que estos lineamientos parecían mantener una relación más cercana con la topografía y las estructuras presentes en la zona (ver Figura 24). Los resultados obtenidos en el software CATALYST fueron exportados a un archivo en formato shapefile para su posterior análisis mediante sistemas de información geográfica.



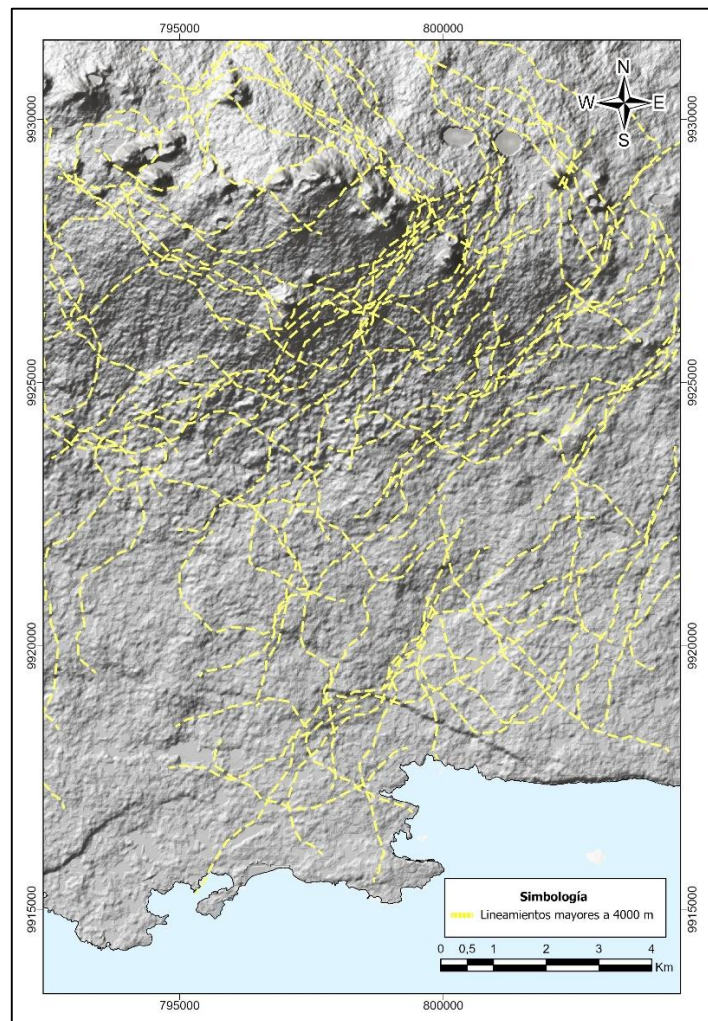
**Figura 24.**

*Lineamientos extraídos automáticamente en el software CATALYST.*



### **Filtro de Lineamientos**

Como se muestra en la Figura 24, se aprecia una densidad considerable de lineamientos, atribuible al hecho de que el programa utilizado para extraerlos identifica diversas características lineales. Para refinarlos, se filtraron aquellos que tuvieran una longitud mayor a 4000 metros (*Figura 25*), descartando estructuras que, visualmente, carecían de representatividad, asegurando una adaptación más precisa al relieve de la zona de estudio sin generar datos que afectaran la claridad visual. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando un software SIG.

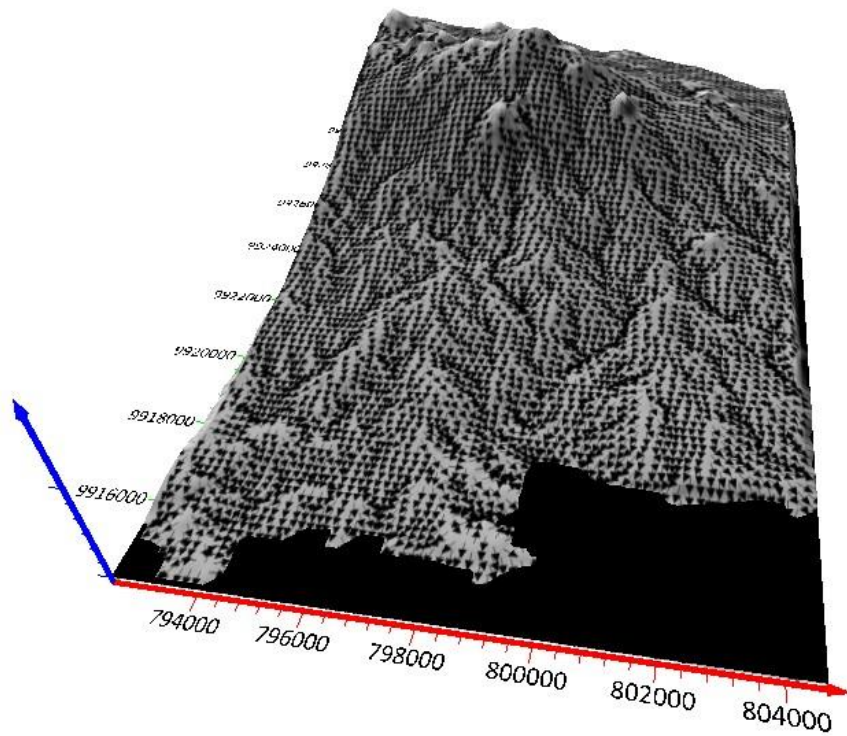
**Figura 25.***Filtros de lineamientos mayores a 4000 m***Clasificación de lineamientos**

Después de aplicar las clasificaciones antes mencionadas, la imagen se vuelve más clara, revelando detalles que antes eran simplemente líneas representativas de la topografía. En este punto del proceso, se identificaron los trazos como elementos geológicos, ya que hasta este momento solo se percibían como trazos que reflejaban la configuración del terreno. En esta fase, se emplearon estos trazos como referencias para determinar las características geológicas y posibles fallas en la región. La evaluación de la estructura se fundamentó en criterios visuales, incluyendo

alteraciones en la topografía, fracturas en el terreno y modificaciones en los patrones de drenaje (ver Figura 26).

**Figura 26.**

*Dirección de flujo con respecto a la topografía de la zona de estudio.*



*Nota.* Imagen realizada en el software SURFER

Esta sección se centra en la evaluación estructural de los trazos, utilizando indicadores visuales como cambios en la configuración del terreno, presencia de cañones profundos y rectilíneos, alteraciones en los patrones de drenaje, formas de los lechos fluviales, patrones lineales en la morfología de las cimas de montañas y fracturas en el terreno.

## Capítulo 4

## **4. Análisis de resultados**

Durante la evaluación de los resultados, se realizó un análisis detallado de los datos obtenidos mediante la aplicación de la metodología desarrollada. Se proporcionó una explicación detallada de los resultados alcanzados en las diversas etapas del proyecto: hidrológica, geomorfológica y de estructuras. Además, se presentaron los mapas de caracterización morfológica como los resultados finales del proceso completo, donde se investigaron las áreas y se explicó el motivo detrás de los hallazgos obtenidos.

En el análisis hidrológico, se ofreció un desglose detallado de la clasificación de la tipología de la red de drenaje y las posibles zonificaciones asociadas. En cuanto al análisis geomorfológico, se describió la clasificación fisiográfica que comprendía 11 categorías, junto con sus correspondientes inclinaciones y elevaciones (desniveles). También se examinó el esquema de estructuras, donde se identificaron los lineamientos.

### **4.1 Mapa de tipologías de red de drenaje**

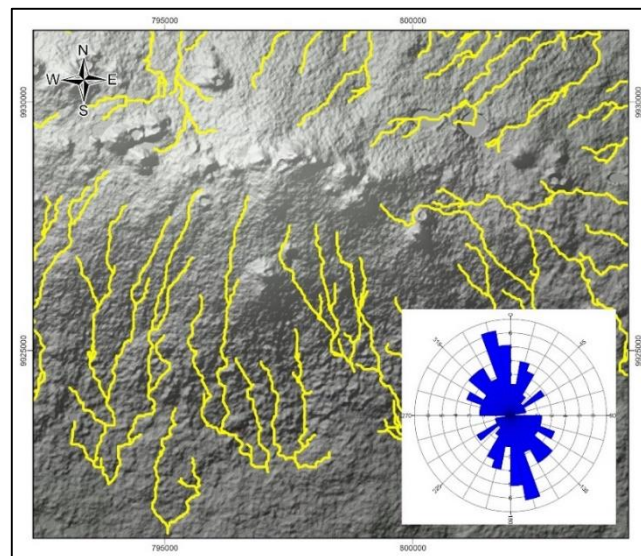
La red de drenaje fue analizada en el contexto regional, y reveló la presencia de cinco tipologías distintas: la red radial, las redes paralelas, barbadas, anguladas y desordenadas. Esta clasificación específica de la red de drenaje abre una ventana de comprensión hacia los posibles materiales de roca que dominan la región.

En el caso de la red radial (ver Figura 27) posee una dirección preferencial en sentido NO-SE ( $135^{\circ}$ - $315^{\circ}$  y  $165^{\circ}$ - $345^{\circ}$ ), en este caso se podrá inferir una presencia preponderante de estructuras volcánicas o geológicas centrales, como conos volcánicos, que han influido en la disposición de los cursos de agua. Esta disposición concéntrica suele asociarse con terrenos volcánicos, donde la emanación de flujos de

lava desde un punto central ha modelado la topografía y, por ende, la dirección de los sistemas fluviales.

**Figura 27.**

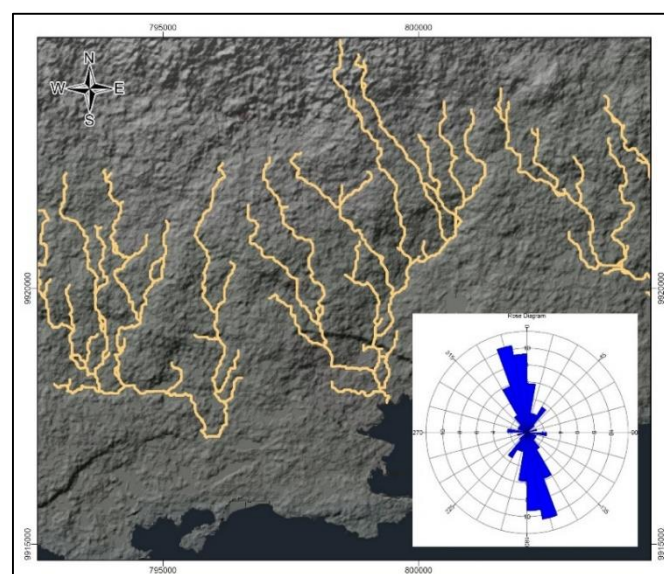
*Representación visual de la red radial.*



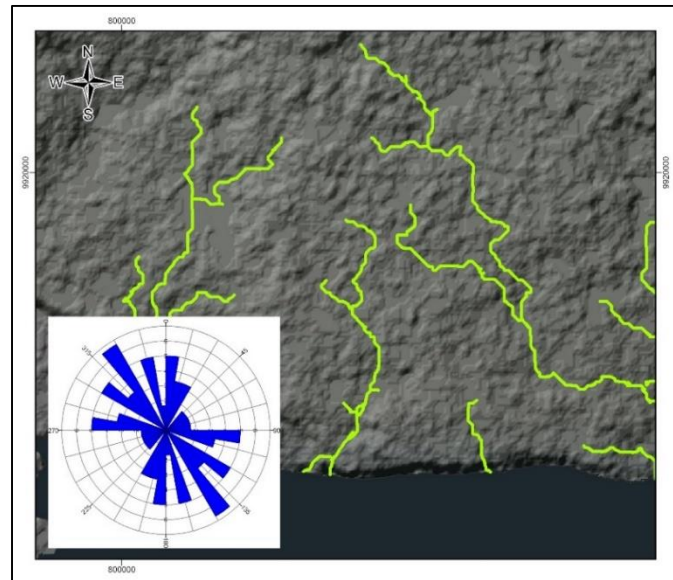
Las redes paralelas (ver Figura 28), por otro lado, posee una dirección preferencial en sentido NO-SE ( $165^{\circ}$  -  $345^{\circ}$ ), estas podrían indicar la presencia de estratos sedimentarios horizontales o estructuras geológicas más uniformes que han influido en la formación de canales de agua con trayectorias consistentes.

**Figura 28.**

*Representación visual de red Paralela en la zona de estudio*



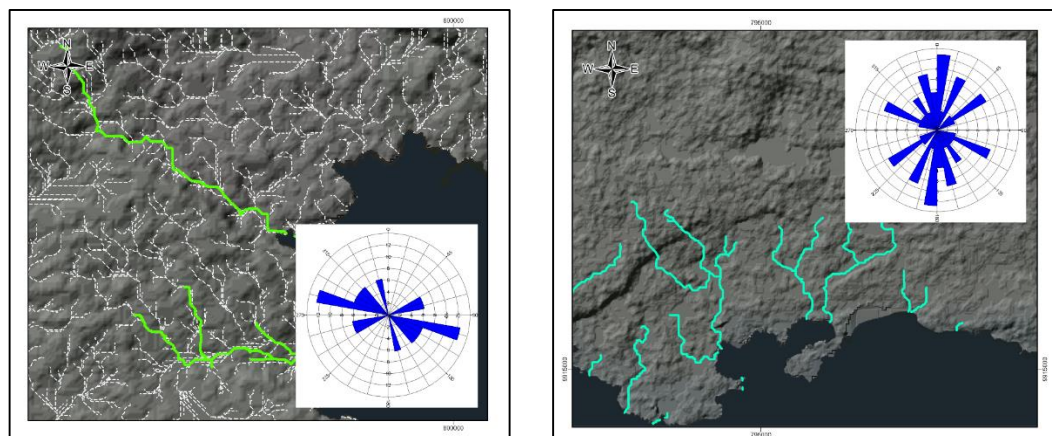
Las redes barbadadas (ver Figura 29), posee una dirección preferencial en sentido NO-SE ( $150^\circ - 330^\circ$ ) con sus múltiples direcciones y conexiones divergentes, podrían señalar la presencia de terrenos complejos, caracterizados por fallas geológicas, pliegues o distintos tipos de rocas, sugiriendo una diversidad geológica en una misma área.



La presencia de redes anguladas y desordenadas podría indicar la influencia de procesos tectónicos complejos, como fallas activas o plegamientos, que han dado lugar a una configuración caótica de la red de drenaje.

**Figura 29.**

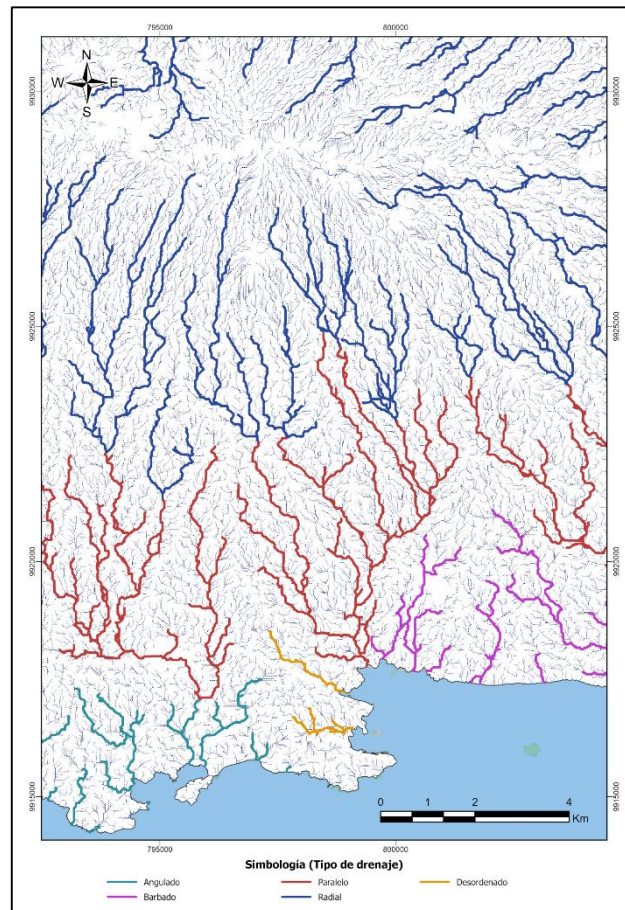
*representación visual de redes anguladas y desordenadas en la zona de estudio.*



A continuación, en la *Figura 30* se muestra el mapa de zonificación de la red de drenaje:

**Figura 30.**

*Clasificación de la red de drenaje de la zona de estudio basado en clasificación de Way (1978)*



## 4.2 Mapa Geomorfológico

Tras llevar a cabo el procedimiento mencionado en esta fase del estudio, se procedió a una redefinición de la clasificación geomorfológica correspondiente a las unidades fisiográficas asociadas a las colinas. Durante este proceso se identificaron un total de 11 unidades fisiográficas distintas, las cuales abarcan terrazas de diferentes niveles (bajas, medias y altas), así como también lomadas, colinas en distintas altitudes, y zonas catalogadas como montañosas.



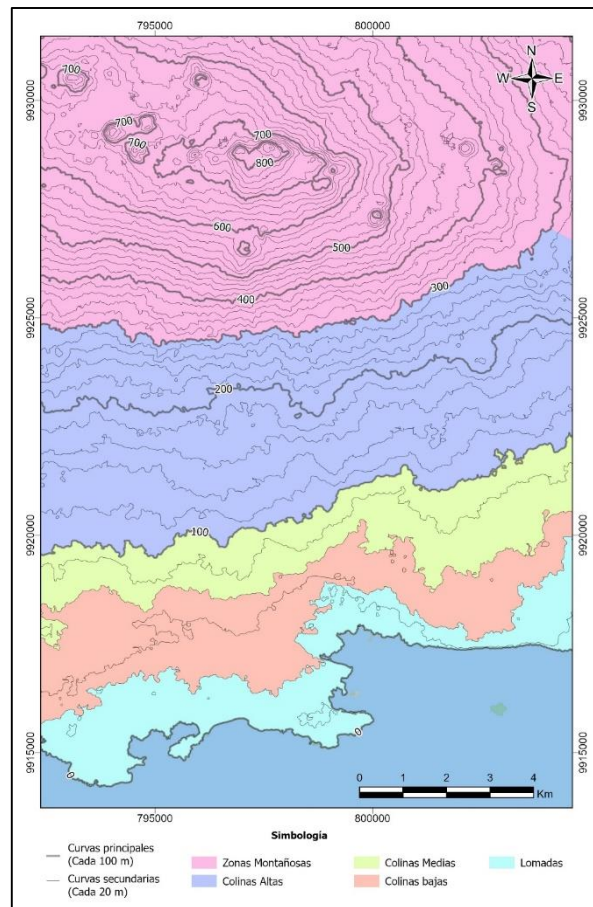


Los paisajes colinados se distribuyen predominantemente en la porción central del área de estudio, abarcando aproximadamente 70 km<sup>2</sup> en dirección E-O. Cada sub-paisaje se categoriza en función de sus características específicas de pendiente y desnivel. Estos parámetros constituyen la base para la elaboración del esquema geomorfológico del área de interés, siendo variables interrelacionadas que permiten discernir las distintas geofomas presentes en la zona de estudio.

A partir de la clasificación previamente mencionada, se realizó una segunda clasificación más generalizadas, debido a que algunas unidades no presentaban mucha variación con respecto a otra, resultando únicamente en zonas Montañosas, colinas altas, colinas medias, colinas bajas y lomadas.

**Figura 32.**

*Clasificación morfométrica resultante de unificación de unidades según altitud y pendiente .*



Luego de esta nueva clasificación se desarrolló un cuadro (ver *Tabla 13*) que identifica y describe las distintas geoformas asociadas al relieve volcánico. Este cuadro facilita futuros análisis geológicos que se realicen en la zona.

**Tabla 14.**

*Posibles geoformas a encontrar en campo*

	<b>Zonas Montañasas</b>	<b>Colinas altas</b>	<b>Colinas medias</b>	<b>Colinas bajas</b>	<b>Lomadas</b>
Productos volcánicos	Conos de lava, Calderas	Conos de ceniza, Lavas A'A y Pahoehoe	Conos de Lava, Lavas A'A	Coladas Volcánicas	Depósitos Piroclásticos
Formas intrusivas ígneas	Diques	Sills	-	-	-
Movimientos en masas	Lahar	Avalanchas	Deslizamientos	-	-
Asociadas a entornos costeros o litorales de islas	Acantilados volcánicos marinos, plataformas de abrasión costeras	Cordones litorales, cárcavas costeras, columnas basálticas en la costa	Barras arenosas, dunas de arena costeras, terrazas marinas	Formaciones deltaicas, canales de desembocadura a Estuarios	Arrecifes de coral, lagunas coralinas, dunas parabólicas y transversales

### 4.3 Lineamientos estructurales

Con la aplicación de la obtención automática, se lograron identificar un total de 1450 polilíneas que, según los parámetros definidos, se ajustaban a la topografía y linealidades del área de Interés (AOI). En la *Tabla 14* se presenta la estadística detallada de los resultados obtenidos.

**Tabla 15.**

*Estadísticas del análisis de longitud de los lineamientos*

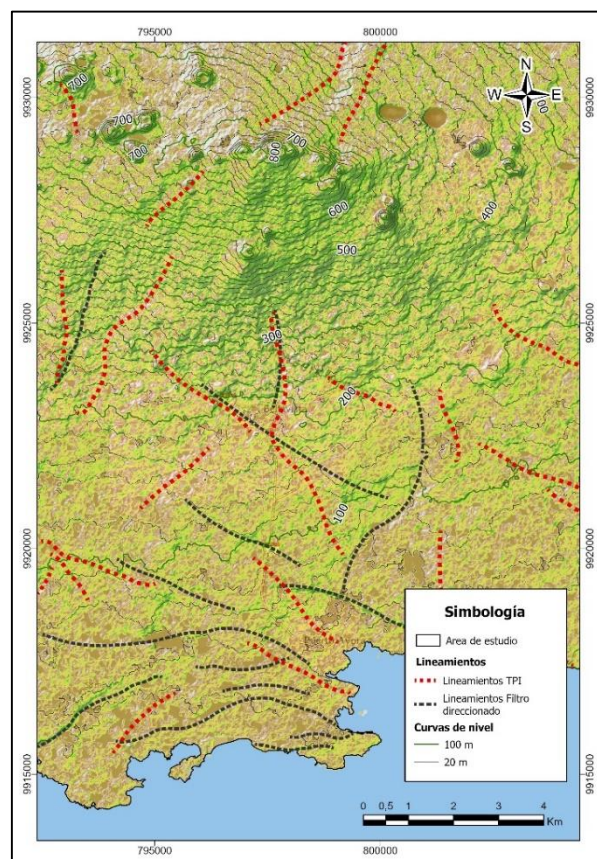
Estadística	Cantidad
Total de lineamientos	1450
Longitud Máxima	9119
Longitud mínima	1970
Longitud promedio	1706

Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de filtrado para eliminar los lineamientos que no resultaban representativos, quedando únicamente aquellos que superaban los 4000 metros, ya que se adaptaban al AOI. Se procedió a un análisis detallado de los lineamientos obtenidos, inicialmente clasificándolos como líneas de falla en función de la marcada presencia de zonas de quebradas con forma lineal y una extensión significativa.

Adicionalmente, se examinó la linealidad de las elevaciones, estableciendo una relación entre linealidad y la presencia de fallas, atribuible a la actividad morfo-tectónica del sector. Este análisis resultó en la identificación de 16 lineamientos a partir del filtro direccionado y 22 obtenidos mediante la extracción automática del TPI (ver Figura 33).

**Figura 33.**

*Patrón de estructuras presentes en el área de estudio*



## Capítulo 5

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

1. El análisis de la red de drenaje en la zona de estudio ha desvelado cinco tipologías distintas, cada una reveladora de la complejidad geológica del área. La presencia de estructuras volcánicas centrales, sugerida por la disposición concéntrica de la red radial, indica procesos volcánicos pasados que han influido en la configuración del paisaje. La existencia de redes paralelas y barbadadas señala la diversidad de estratos sedimentarios, estructuras geológicas y terrenos complejos presentes en la región. Además, la presencia de redes anguladas y desordenadas sugiere la influencia de procesos tectónicos, como fallas activas o plegamientos, que han contribuido a una red de drenaje de configuración caótica.
2. El análisis geomorfológico de la zona de estudio reveló 11 unidades fisiográficas que se simplificaron a 5 para facilitar la comprensión de la distribución de posibles geoformas, incluyendo zonas montañosas, colinas altas, colinas medias, colinas bajas y lomadas. Asimismo, la identificación de los distintos tipos de red de drenaje sugiere la presencia de diversos procesos volcánicos en la zona de estudio. Estos podrían incluir erupciones explosivas que formaron cráteres, conos y domos, así como el flujo de lava que se extiende hacia el sur. La diversidad de estas geoformas indica una historia geológica compleja con la actividad volcánica como un factor significativo en la configuración del paisaje.
3. A través de la extracción automática se identificaron un total de 1450 líneas geológicas en el Área de Interés (AOI), siendo 22 y 16 el número final de lineamientos obtenidos mediante la extracción automática del TPI y el filtro direccionado, respectivamente. Este enfoque permitió destacar las estructuras más relevantes y representativas, con longitudes superiores a 4000 metros,

ofreciendo una visión detallada de la morfología y la distribución de las posibles líneas de falla en la región.

Al implementar esta metodología, se posibilita la obtención de datos preliminares esenciales para optimizar de manera efectiva los recursos en fases subsiguientes de trabajo de campo.

Este enfoque puede ser aplicado con éxito en la planificación de visitas técnicas, salidas de campo, estudios e investigaciones, generando ahorros significativos tanto en tiempo como en recursos financieros. La capacidad de planificar estaciones de trabajo de manera más precisa y eficiente se traduce en una mejora sustancial en la efectividad de las operaciones, permitiendo una recopilación de datos más enfocada y relevante para los objetivos específicos del estudio. En última instancia, esta metodología ofrece un enfoque práctico y rentable para la investigación geológica, brindando la oportunidad de maximizar los recursos disponibles y mejorar la calidad de los datos recopilados en el campo.

## **5.2 Recomendaciones**

1. Para consolidar la fiabilidad de los resultados obtenidos, se sugiere llevar a cabo validaciones en campo. La verificación directa de las características geológicas y topográficas permitirá confirmar las interpretaciones realizadas a partir de datos satelitales y modelos digitales, mejorando así la confiabilidad del estudio.
2. Considerar la aplicación de tecnologías emergentes, como el uso de vehículos aéreos no tripulados (drones) equipados con sensores geoespaciales, para obtener datos de alta resolución y actualizados. Estas herramientas pueden mejorar la precisión y la eficiencia en la recopilación de información en áreas de difícil acceso.
3. Establecer mecanismos para compartir y divulgar los resultados del estudio con la comunidad científica, autoridades locales y otros interesados. La

transparencia y la comunicación efectiva contribuirán a maximizar el impacto y la utilidad de los hallazgos.

4. Integrar los datos geomorfológicos y estructurales para desarrollar mapas de vulnerabilidad, que muestren las áreas más propensas a sufrir daños en caso de eventos geológicos. Estos mapas son esenciales para la planificación territorial y la toma de decisiones en la gestión de riesgos



## Bibliografía

Auken, E., Violette, S., d'Ozouville, N., Deffontaines, B., Sørensen, K. I., Viezzoli, A., & de Marsily, G. (2009). An integrated study of the hydrogeology of volcanic islands using helicopter borne transient electromagnetic: Application in the Galápagos Archipelago. *Comptes Rendus - Geoscience*, 341(10–11), 899–907. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.006>

Abdullah, A., Nasser, S. and Ghaleeb, A. (2013) Landsat ETM-7 for Lineament Mapping Using Automatic Extraction Technique in the SW Part Taiz Area, Yemen. *Global Journal of Human Social Science (B)*, XIII, 35-38

Aguiló, M., Albaladejo, J., Aramburu, M. P., Carrasco, R., Castillo, V., Ceñal, M. de los A., Cifuentes, M., Cifuentes, P., Cristóbal, A., Martín, J., Escribano, R., Glaría, G., González, S., González, G., Iglesias, J., Iglesias, E., Lopez, L., Martín, F., Martínez, M., ... Valero, F. (2014). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Fundación Conde del Valle de Salazar

Aguirre, R. (2009). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*. [https://www.researchgate.net/publication/286048677\\_Modelos\\_Digitales\\_de\\_Terreno\\_atributos\\_primarios\\_y\\_secundarios](https://www.researchgate.net/publication/286048677_Modelos_Digitales_de_Terreno_atributos_primarios_y_secundarios)

Anderson, M., Wanless, V. D., Schwartz, D. M., McCully, E., Fornari, D. J., Jones, M. P., & Soule, S. A. (2018). Submarine deep-water lava flows at the base of the western Galápagos platform. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19, 3945–3961. <https://doi.org/10.1029/2018GC007632>

Chadwick, W.W., Howard, K.A. (1991) The pattern of circumferential and radial eruptive fissures on the volcanoes of Fernandina and Isabela islands, Galapagos. *Bull Volcanol* 53, 259–275. <https://doi.org/10.1007/BF00414523>

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*, McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. McGraw-Hill, New York.

CTN y SIGTIERRAS. (2015). Manual de Identificación de geoformas según grupo genético. Proyecto: Cartografía Temática de Ecuador, Escala 1:25.000

Das, S., Pardeshi, S. D., Kulkarni, P. P., & Doke, A. (2018). Extraction of lineaments from different azimuth angles using geospatial techniques: a case study of Pravara basin, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(8), 160.

De Oliveira Andrades Filho, C., & De Fátima Rossetti, D. (2012). Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 33(4), 1058-1077

de Silva, S., & Lindsay, J. M. (2015). Primary Volcanic Landforms. In *The Encyclopedia of Volcanoes* (pp. 273–297). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00015-8>

Demek, E. (1972). *Manual of detailed geomorphological mapping* (Akademia). Czechoslovak Academy of Science.

Domínguez, C. (2011). Análisis de la variabilidad espacial y temporal de la trascolación en la isla Santa Cruz. Bachelor's thesis, QUITO/EPN.

El-Sawy, K., Ibrahim, A. M., El-Bastawesy, M. A., & El-Saud, W. A. (2016). Automated, manual lineaments extraction and geospatial analysis for Cairo-Suez district (Northeastern Cairo-Egypt), using remote sensing and GIS. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(5), 491-500

Eras-Almeida, A. A., Egado-Aguilera, M. A., Blechinger, P., Berendes, S., Caamaño, E., & García-Alcalde, E. (2020). Decarbonizing the Galapagos Islands: Techno-economic perspectives for the hybrid renewable mini-grid Baltra-Santa Cruz. *Sustainability (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/su12062282>

Geist, D., Naumann, T., Larson, P. (1998). Evolution of Galápagos Magmas: Mantle and Crustal Fractionation without Assimilation. *Journal of Petrology*, V39. 10.1093/etroj/39.5.953. <https://doi.org/10.1093/etroj/39.5.953>

Geist, D., White, W. M., Albarede, F., Harpp, K., Reynolds, R., Bilchert-Toft, & Kurz, M. D. (2002). Volcanic evolution in the Galapagos The dissected shield of Volcan Ecuador. AGU and Geochemical Society, 3.

Geist, D.J., Bergantz, G. and Chadwick, W.W., Jr. (2014). Galápagos Magma Chambers. In The Galápagos (eds K.S. Harpp, E. Mittelstaedt, N. d'Ozouville and D.W. Graham). <https://doi.org/10.1002/9781118852538.ch5>

Geist. (1998). Evolution of Galápagos Magmas Mantle and crustal fractionation without assimilation.

Gomarasca, M.A. (2010). Fundamentos de geomática. Appl Geomat 2, 137–146. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0029-6>

GSC. (2022). <https://www.galapagossociety.org/>

Harpp y Geist DJ. (2018). The Evolution of Galápagos Volcanoes: An Alternative Perspective. Front. Earth Sci. 6:50. doi: 10.3389/feart.2018.00050

Harpp, K., Mittelstaedt, E., Graham, D. W., Violette, S., Pryet, A., Deffontaines, B., Fortin, J., & Adelinet, M. (2014). Hydrogeology of the Galápagos Archipelago: An Integrated and Comparative Approach Between Islands. In Geophysical Monograph (Vol. 204). <http://seamless.usgs.gov>

Harpp, K., Geist, D. (2021). The Galápagos Islands. Encyclopedia of Geology (Second Edition). Academic Press. Pages 659-673. ISBN 9780081029091. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12084-6>.

Hart, B. S., & Sagan, J. A. (2007). Curvature for visualization of seismic geomorphology. Geological Society Special Publication, 277, 139–149. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2007.277.01.08>

Hashim, M., Ahmad, S., Johari, M. A. M., & Pour, A. B. (2013). Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. Advances in Space Research, 51(5), 874-890.

Herbrich, A., Hauff, F., Hoernle, K., Werner, R., Garbe-Schönberg, D., White, S. (2016). A 1.5Ma record of plume-ridge interaction at the Western Galápagos Spreading

Center (91°40'–92°00'W). *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Volume 185. Pages 141-159. ISSN 0016-7037. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2016.04.036>.

Herrera, I., Paque, R., Maertens, M., & Vanacker, V. (2022). History of Land Cover Change on Santa Cruz Island, Galapagos. *Land*, 11(7), 1017. <https://doi.org/10.3390/land11071017>

INEC. (2022). Resultados del Censo Poblacional 2022.

Korres, W., & Schneider, K. (2018). GIS for Hydrology. *Comprehensive Geographic Information Systems*, 51–80. doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.09635-4

Li, Y.; Hu, T.; Zheng, G.; Shen, L.; Fan, J.; Zhang, D. (2019). An Improved Simplified Urban Storm Inundation Model Based on Urban Terrain and Catchment Modification. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w11112335>

McBirney y Williams. (1969). *Geology and Petrology of the Galápagos Islands*. Geological Society of America. ISBN 9780813711188. <https://doi.org/10.1130/MEM118>

Merlen G. (2009). The 1982–83 El Niño: some of its consequences for Galápagos wildlife. *Oryx*. 1984;18(4):210-214. doi:10.1017/S0030605300019244

Meschede, M., Barckhausen, U., & Worm, H. -U. (1998). Extinct spreading on the Cocos Ridge. *Terra Nova*, 10(4), 211–216. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.1998.00195.x>

Mouginis-Mark, P. J., Rowland, S. K., & Garbeil, H. (1996). Slopes of Western Galapagos volcanoes from airborne interferometric radar. *Geophysical Research Letters*, 23(25), 3767–3770. <https://doi.org/10.1029/96GL03280>

Olaya, V. (2009). Basic land-surface parameters. In *Developments in Soil Science* (Vol. 33, Issue C). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00006-8)

Olusola, E., Ajiboye, O., Olugbenga, G. (2022). Drainage network extraction and watershed delineation using remote sensing and geographic information system of Imo

state, Nigeria. *Global Scientific and Academic Research Journal of Multidisciplinary Studies* ISSN: 2583-4088

Pacco, E. (2010). Capacidad de uso mayor para determinar conflictos de uso de la tierra en la microcuenca Picuroyacu, Tingo María - Perú. Tingo María: Universidad Agraria de la Selva Tingo María

PCI Geomatics. (2020). CATALYST.

Pedraza, J., Carrascop, R., Díez Andrés, Martín, J., Martín, A., & Sanz, Á. (1996). *GEOMORFOLOGÍA (Principios, Métodos y Aplicaciones)*.

Prasad, A. D., Jain, K., & Gairola, A. (2013). Mapping of lineaments and knowledge base preparation using geomatics techniques for part of the Godavari and Tapi basins, India: A case study. *International Journal of Computer Applications*, 70(9).

Pryet, A. (2011). Hydrogeology of volcanic islands: a case-study in the Galapagos Archipelago (Ecuador). <https://theses.hal.science/tel-00747313>

Ramón, P., Bernard, B., Vallejo, S. (2011). April 2009 Fernandina volcano eruption, Galapagos islands, Ecuador: Thermal Mapping of the Lava Flows emitted. Conference Paper.

Re, V., Rizzi, J., Tuci, C. et al. (2023). Challenges and opportunities of water quality monitoring and multi-stakeholder management in small islands: the case of Santa Cruz, Galápagos (Ecuador). *Environ Dev Sustain* 25, 3867–3891. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02219-4>

Reuter, H. I., Hengl, T., Gessler, P., & Soille, P. (2009). Preparation of DEMs for geomorphometric analysis. In *Developments in Soil Science* (Vol. 33, Issue C). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00004-4)

Richards, M. A., Duncan, R. A., & Courtillot, V. E. (1989). Flood Basalts and Hot-Spot Tracks: Plume Heads and Tails. *Science*, 246(4926), 103–107. <https://doi.org/10.1126/science.246.4926.103>

Rubio., A y Gutiérrez., J. (1997). Los sistemas de información geográficos: origen y perspectivas. Revista general de información y documentación. Vol. 7 , nº1. Servicios de publicaciones Universidad Complutense. Madrid

Scheffers Anja M. , Simon M. May, Dieter H. Kelletat. (2015). Landforms of the World with Google Earth. Understanding our Environment. Springer Dordrecht. ISBN 978-94-017-9712-2. DOI <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9713-9>

Schwartz, D. M., Harpp, K., Kurz, M. D., Wilson, E., & Van Kirk, R. (2022). Low-volume magmatism linked to flank deformation on Isla Santa Cruz, Galápagos Archipelago, using cosmogenic <sup>3</sup>He exposure and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of fault scarps and lavas. Bulletin of Volcanology, 84(9), 82. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01575-3>

Sinton, C. W., Christie, D. M., & Duncan, R. A. (1996). Geochronology of Galápagos seamounts. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 101(B6), 13689–13700. <https://doi.org/10.1029/96JB00642>

Smith, A. D. (2007). A plate model for Jurassic to Recent intraplate volcanism in the Pacific Ocean basin. In Special Paper 430: Plates, Plumes and Planetary Processes (pp. 471–495). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2007.2430\(23\)](https://doi.org/10.1130/2007.2430(23))

Steinfartz, S. (2011). When Hotspots Meet: The Galápagos Islands: A Hotspot of Species Endemism Based on a Volcanic Hotspot Centre. In: Zachos, F., Habel, J. (eds) Biodiversity Hotspots. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20992-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20992-5_23)

Tapia W., Ospina P., Quiroga D., González J.A., Montes C. (2009). Ciencia para la sostenibilidad en Galápagos: el papel de la investigación científica y tecnológica en el pasado, presente y futuro del archipiélago. Parque Nacional Galápagos. Universidad Andina Simón Bolívar, Universidad Autónoma de Madrid y Universidad San Francisco de Quito.

UNESCO. (2018). Galápagos Islands. <https://whc.unesco.org/en/list/1/>

Viers, G. (1967). Eléments de géomorphologie. Nathan, Paris.

Villalta Echeverria, M.D.P.; Viña Ortega, A.G.; Larreta, E.; Romero Crespo, P.; Mulas, M. (2022). Lineament Extraction from Digital Terrain Derivate Model: A Case Study in the Girón–Santa Isabel Basin, South Ecuador. *Remote Sens.*14, 5400. <https://doi.org/10.3390/rs14215400>

Way. (1979). Clasificacion de tipologia de red de drenaje.

Weiss, A. (2001). Topographic Position and Landforms Analysis. *Topographic Position and Landforms Analysis*

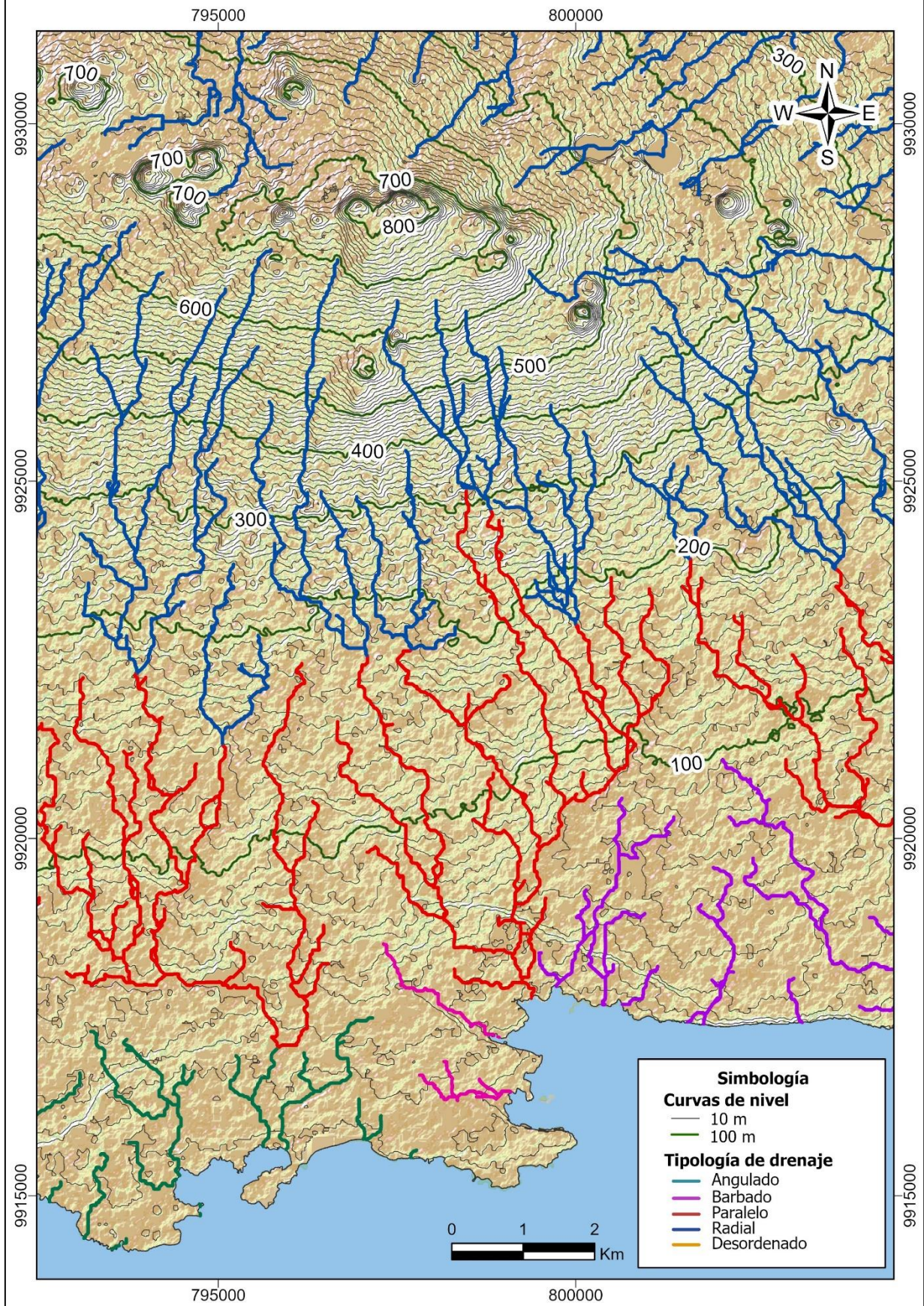
Wilson E. L., Harpp K. S., Schwartz D. M., Van Kirk R. (2022). The Geochemical Evolution of Santa Cruz Island, Galápagos Archipelago . *Frontiers in Earth Science*. Volume 10. ISSN 2296-6463. doi: 10.3389/feart.2022.845544

Woolley, R. R. (1961). Cloudburst Floods In Utah 1850-1938. <https://pubs.usgs.gov/wsp/0994/report.pdf>

Yilmaz., S. (2019). Chapter 7 - Modeling and Optimization Approaches in Design and Management of Biomass-Based Production Chains. Academic Press. Pages 185-236. ISBN 9780128142783. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814278-3.00007-8>.

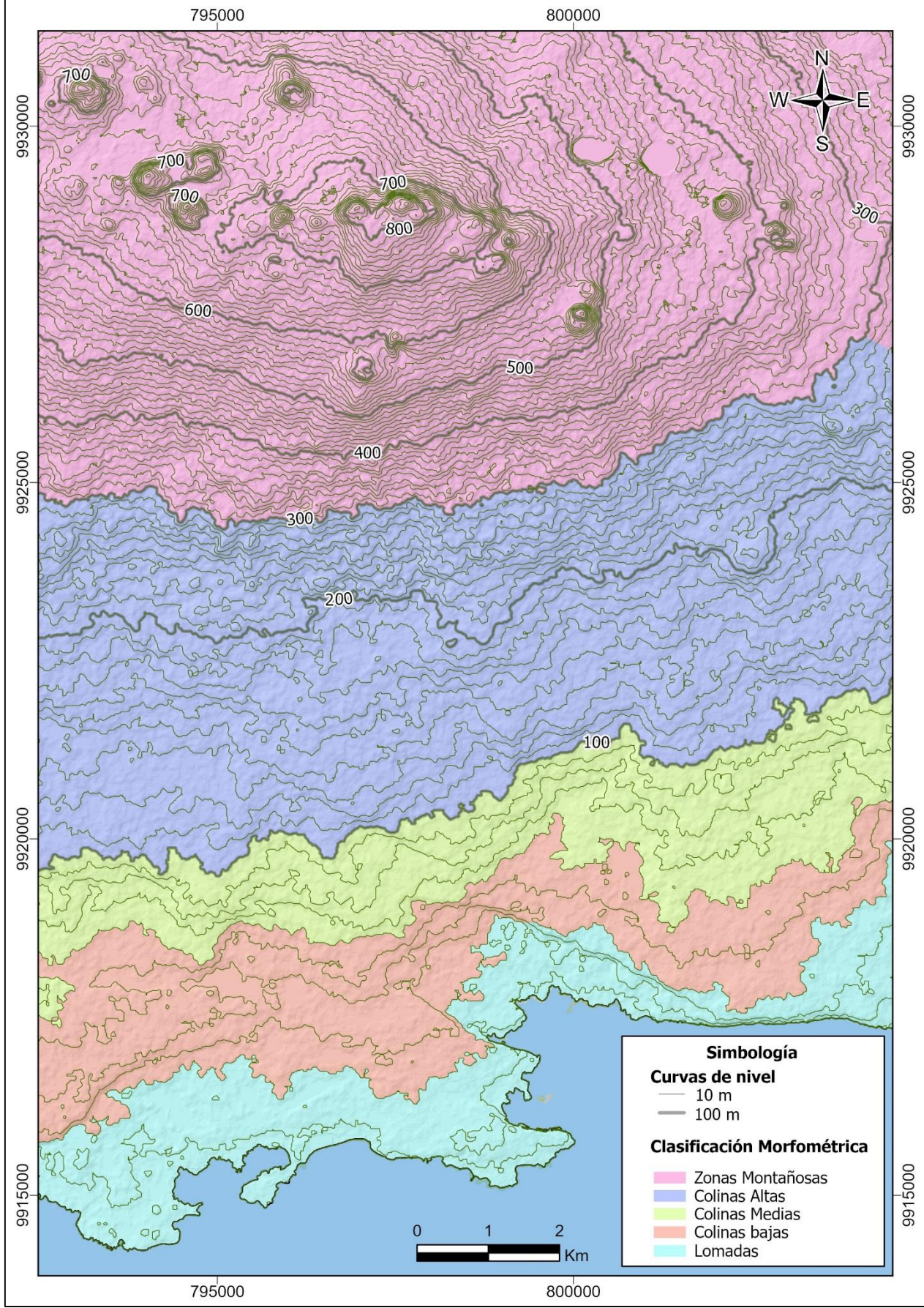
# Apéndice

## MAPA DE CLASIFICACION DE RED DE DRENAJE SEGÚN WAY (1979)

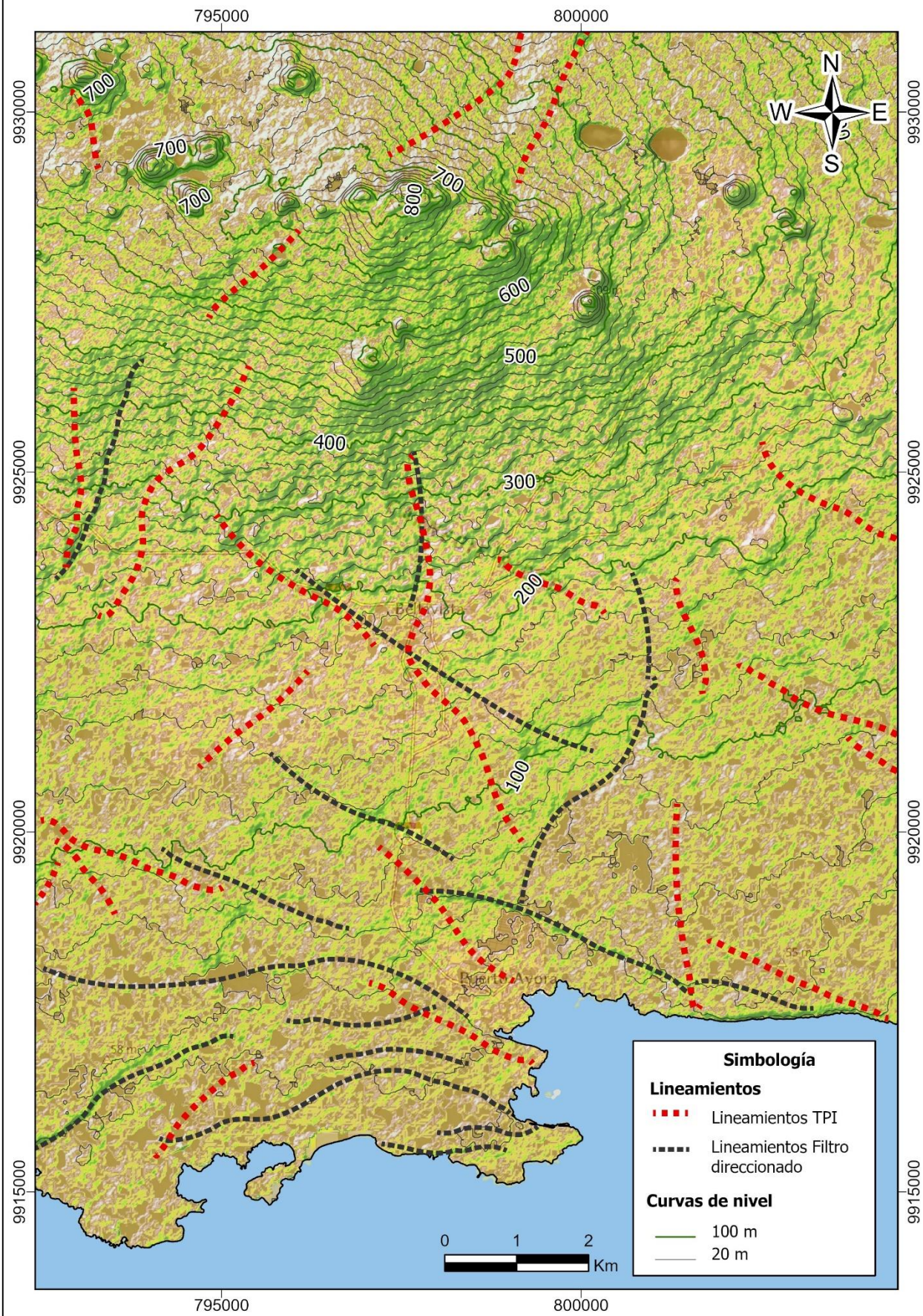




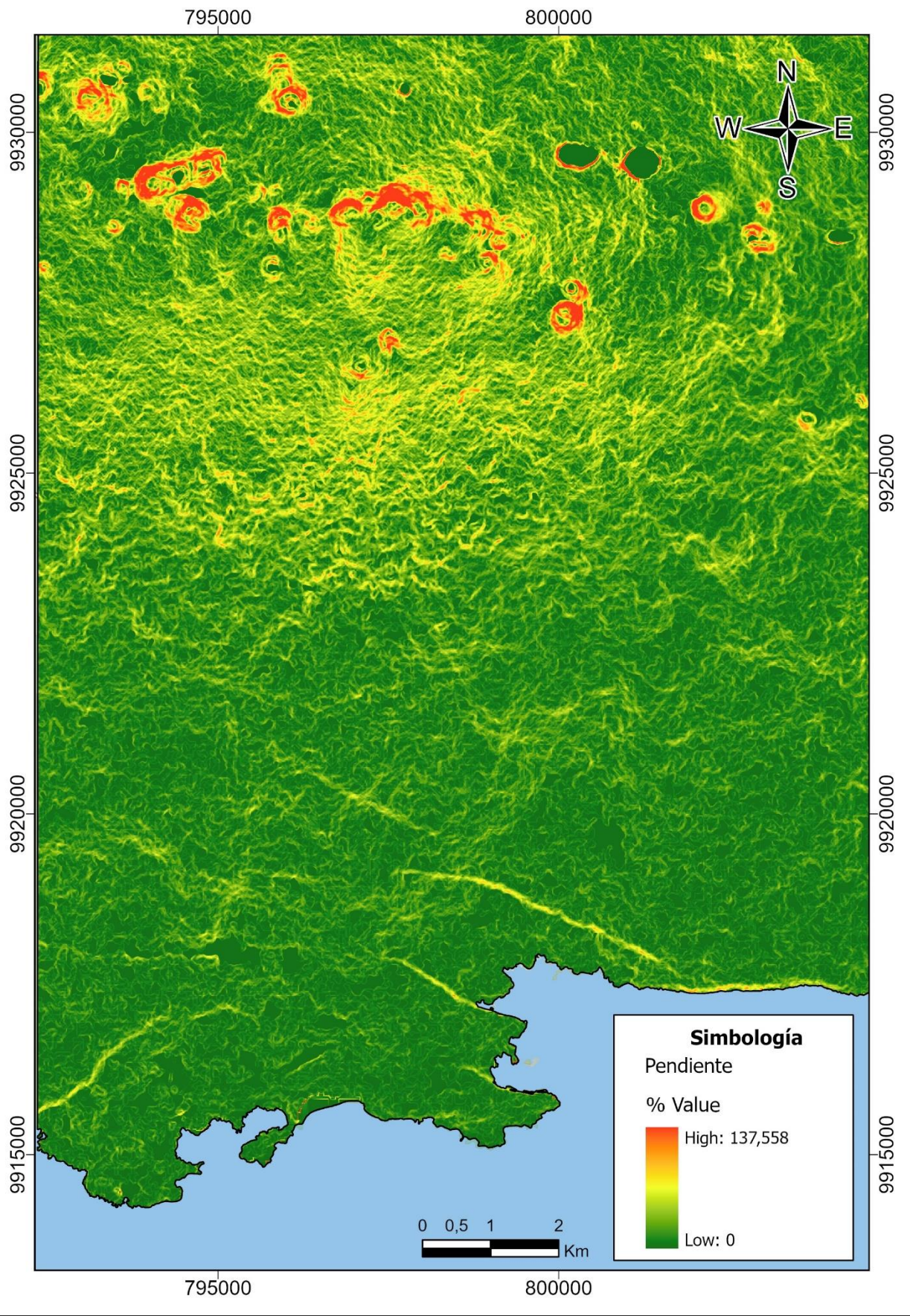
# MAPA DE CLASIFICACION UNIDADES MORFOMETRICAS DEL AOI



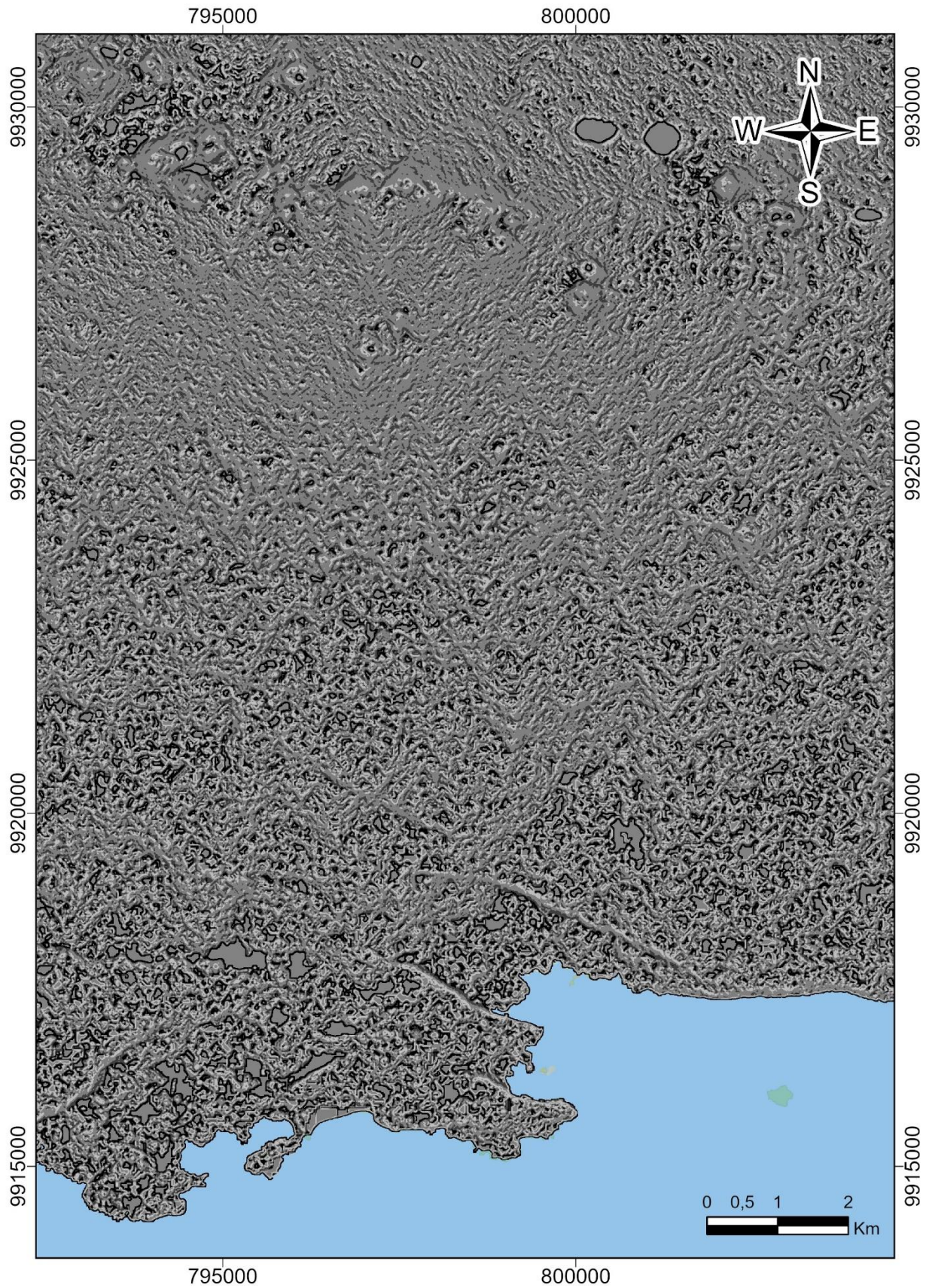
# MAPA DE LINEAMIENTOS DE LA ZONA DE ESTUDIO



# MAPA DE PENDIENTES (SLOPE)



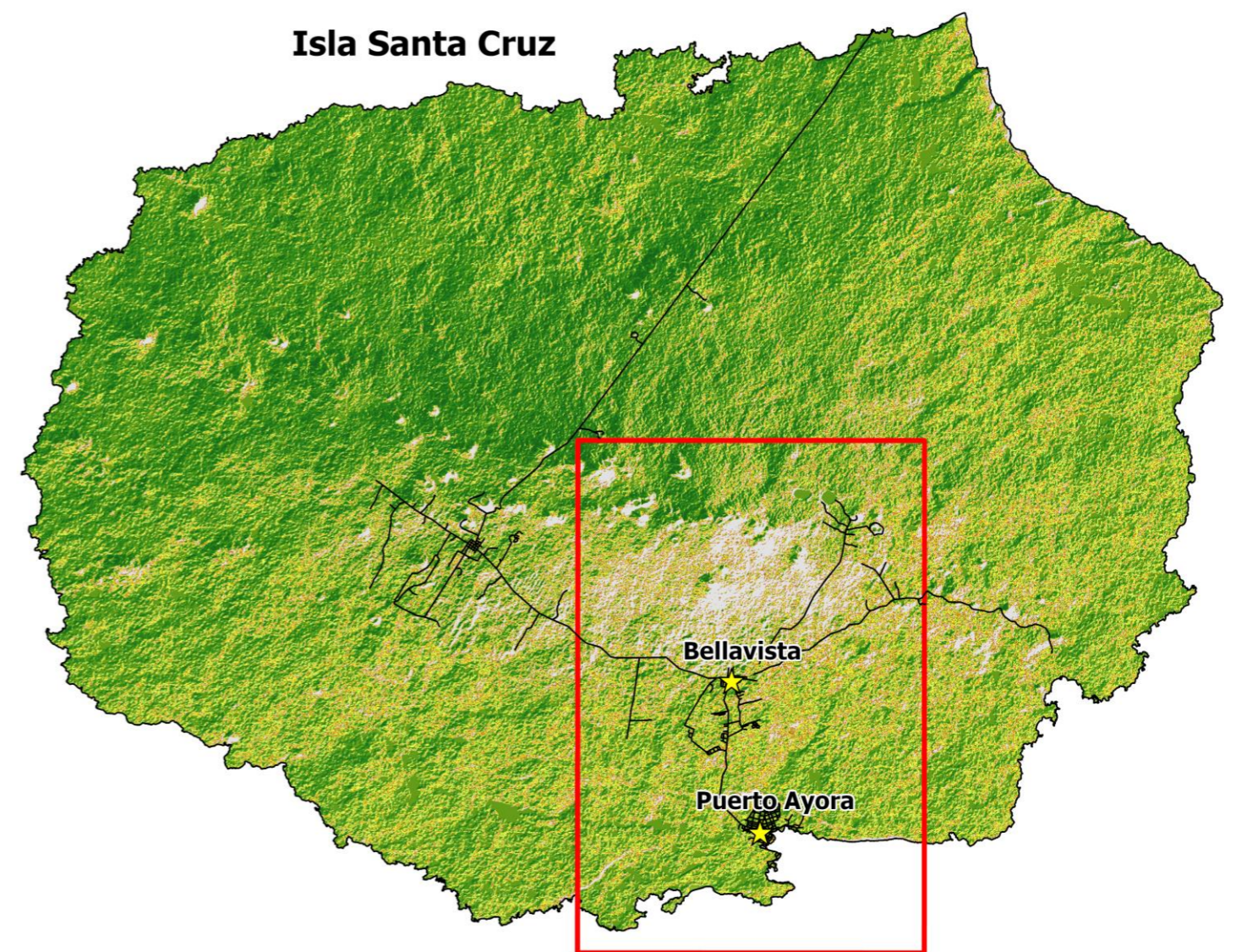
# ÍNDICE DE POSICIÓN TOPOGRÁFICO (TPI) - CELL SIZE 7X7/TIPO RECTANGULAR



# Modelamiento hidrogeológico como base para caracterización morfométrica al sureste de Santa Cruz, Galápagos

## PROBLEMA

Las Islas Galápagos son objeto de gran interés científico debido a sus características **geológicas, geográficas, oceanográficas y biológicas**. La falta de información geológica y geográfica derivado de **la lejanía, dificultad de acceso a las islas, la juventud de la investigación geológica en las islas y la limitación de fondos** dificulta significativamente el conocimiento de la dinámica en las islas.

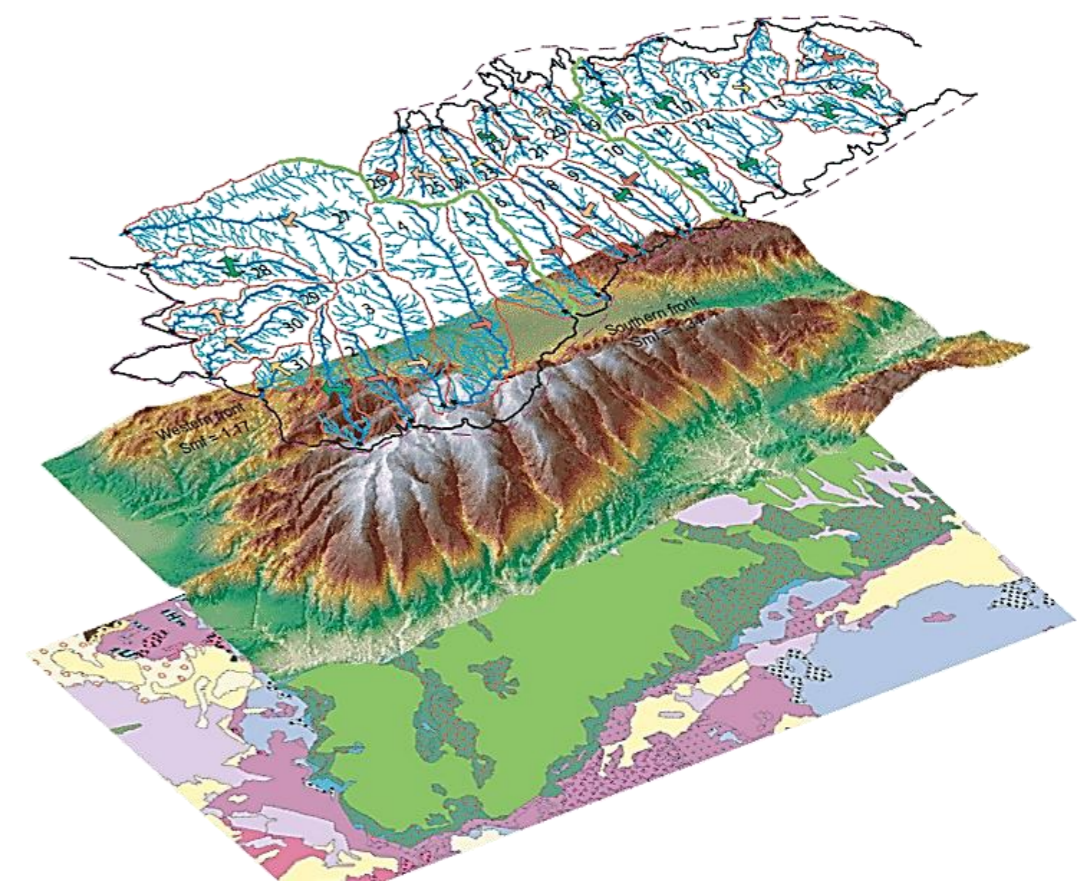


## OBJETIVO GENERAL

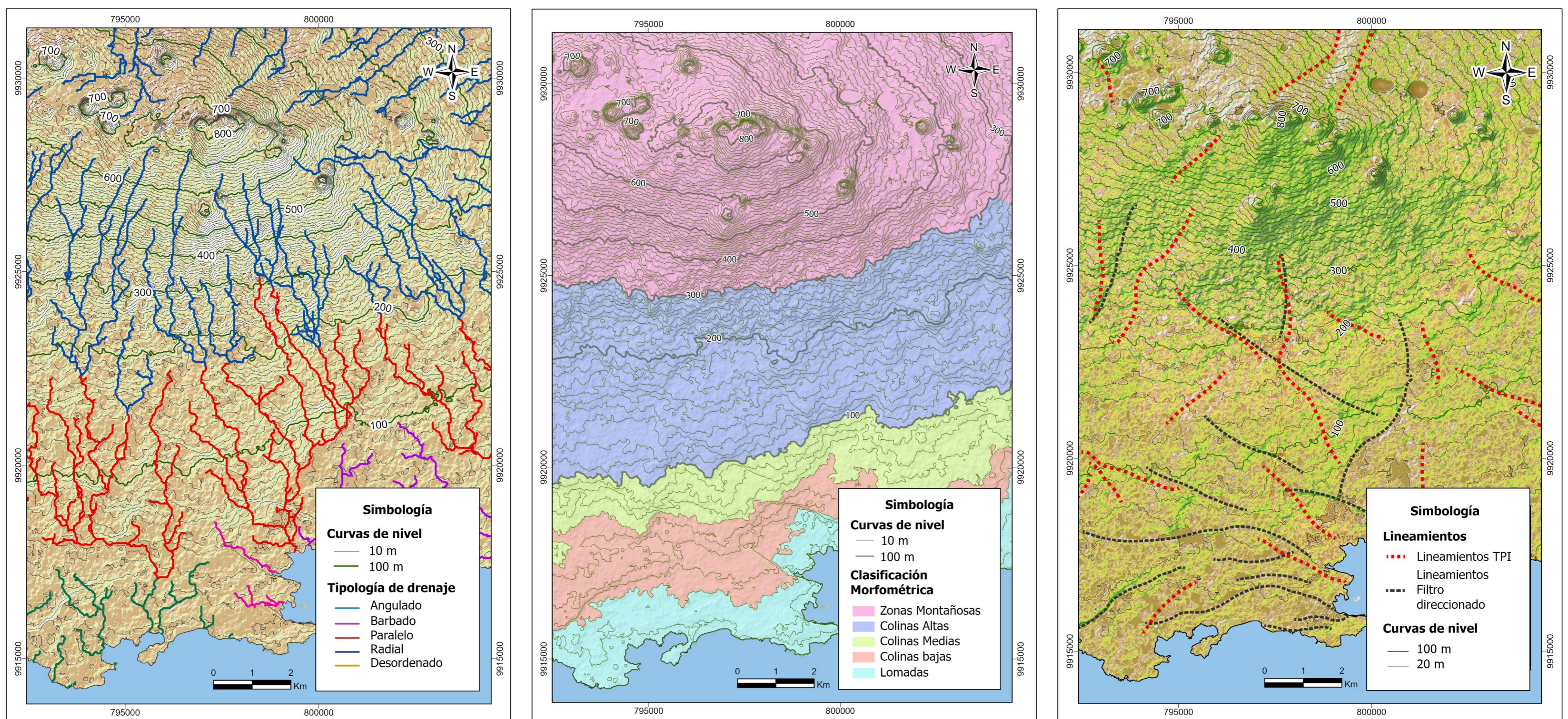
**Realizar** un estudio geomorfológico y estructural **mediante** el análisis de modelos digitales de terreno, **para** evaluar el comportamiento geológico e hidrológico

## PROPUESTA

La propuesta se enfoca en abordar la insuficiencia de información geológica en las Islas Galápagos mediante un estudio geomorfológico basado en un modelo hidrogeológico. Se emplearán **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**, como **modelos digitales de terreno** y **sensores remotos**, para analizar las estructuras y geformas geológicas. Las estructuras geomorfológicas se caracterizarán, y se desarrollará una herramienta de análisis de geformas considerando la **tipología de drenaje** y **características morfométricas**. Los resultados se pondrán en una base de datos, siendo esencial para el reconocimiento en campo y la complementación de trabajos que contribuyan a la identificación de amenazas naturales en las Islas.



## RESULTADOS



Se han reconocido **5 tipologías de redes de drenaje** en el área de estudio: radial, paralela, barbada, angulada y desordenada. Cada una de estas tipologías sugiere la presencia de distintos contextos geológicos superficiales en la zona.

Además, se han identificado **11 unidades fisiográficas** que, con el objetivo de simplificar la comprensión de la distribución de posibles geformas, se han condensado en **5**: zonas montañosas, colinas altas, colinas medias, colinas bajas y lomadas.

En la parte sur del área de estudio, se han observado **lineamientos en dirección NO-SE**, con longitudes que varían entre **4000 y 3000 m**.

## CONCLUSIONES



El reconocimiento de diferentes tipologías de redes de drenaje en la región sugiere diversas geformas vinculadas a procesos geológicos específicos. La **tipología radial** indica presencia de conos de lava y calderas en zonas montañosas, mientras que la **paralela** se relaciona con flujos de lavas y posible presencia de diques y sills. Las redes de drenaje **barbadas** sugieren la posibilidad de **lahares y deslizamientos** en colinas altas y medias. La tipología **angulada** revela características costeras en colinas bajas y lomadas, y la **desordenada** señala geformas variadas en colinas medias y bajas.



Estos hallazgos enriquecen la comprensión de la **evolución geológica de la isla**, facilitando la **identificación de zonas de muestreo** en campo. Además, estos resultados pueden tener aplicaciones técnicas significativas en diversos campos, como el estudio de **riesgos geológicos**, la **planificación territorial**, la **gestión de recursos hídricos** y la **conservación de las islas y sus especies**, ampliando así su impacto en la toma de decisiones y el desarrollo sostenible de las islas.