

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL SISTEMA
VOLCÁNICO SEDIMENTARIO EN LA ZONA NORESTE DE LA
LORENZA-CÓRDOBA.**



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2856 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Daniel Andrés Pernet Suárez
Maira Alejandra Villegas Sánchez.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL.
MONTERÍA, CÓRDOBA.

2021

**CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DEL SISTEMA
VOLCÁNICO SEDIMENTARIO EN LA ZONA NORESTE DE LA
LORENZA-CÓRDOBA.**



**Daniel Andrés Pernet Suárez
Maira Alejandra Villegas Sánchez.**

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de proyecto de
Investigación y/o Extensión, como parte de los requisitos para optar
al Título de Ingeniero Ambiental.**

Director (es):

**Doris Mejía Ávila, Ingeniera Forestal PhD. Ingeniería Geográfica.
Zoraya Yasquine Martínez Lara, Geóloga. MsC. Geomorfología y
suelos.**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2021

La responsabilidad ética, legal y científica, de las ideas, conceptos, y resultados del proyecto de investigación, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 59, Acuerdo N° 022 del 21 de febrero de 2018 del Consejo Superior.

Tener en cuenta los Artículos y directrices establecidos la Resolución 1775, del 21 de agosto de 2019. En donde se establecen las directrices y las políticas de funcionamiento del repositorio institucional de la Universidad de Córdoba (Artículos tercero, octavo, once, entre otros).

“11 – BUENA FE: La universidad considera que la producción intelectual que, los profesores, funcionarios administrativos y estudiantes le presenten, es realizada por éstos, y que no han transgredido los derechos de otras personas. En consecuencia, la aceptará, protegerá, publicará y explotará, según corresponda y lo considere pertinente”. Artículo 1, Acuerdo N° 045 del 25 de mayo de 2018 del Consejo Superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

*Gracias a Dios, por guiar mí camino a esta bella carrera y ser el aliento
que siempre necesité.*

*Gracias a mis padres Julio y Norvis, porque todo es por y para ellos, por
brindarme el amor, la confianza y comprensión durante todos los años de
mi vida que me hacen querer ser mejor persona cada día. Sin ustedes
nada sería posible.*

*Gracias a mis hermanos, porque el deseo de ser un ejemplo para ellos
también me impulsa a ser mejor y nunca rendirme.*

*Gracias a los amigos que en este bello camino pude encontrar, porque
fueron soporte para todos los tropiezos que por alguna razón me hicieron
dudar.*

*Gracias Caro, porque tú fuiste quien me salvó y, enseñó que los
problemas no son más grandes que el deseo de seguir adelante.*

*Gracias a Daniel, por confiar en que podía ser la compañera que podría
apoyarlo en este proceso, nada fue fácil, pero me alegra poder lograrlo
juntos, todo valió la pena.*

*Gracias a Daniela, mi amiga de siempre y para siempre, porque sus
sonrisas y abrazos reconfortan mi alma.*

*Gracias a las profes Zoraya y Doris, por confiar en que podríamos
lograrlo, por las veces que con sonrisas nos impulsaron a seguir adelante
y por ser modelos que sin duda alguna quiero seguir.*

Maira

No importa el tiempo que pase, nunca me cansare de agradecerle a mis padres Lucinda y Celín que me han apoyado en todas mis decisiones y por ello soy la persona que está aquí ahora, gracias por estar siempre conmigo, por el amor que me han dado y por impulsarme a mejorar todos los días, los amo.

Gracias a mis hermanas Natalie por escucharme cuando lo necesitaba y Lucelis por estar allí dando todo su amor cuando veía que no podía más.

Gracias a mis amigos con los cuales he recorrido todo este proceso, comenzando en 2015 con los primeros juegos de ingeniería y después de un largo camino, culminando así con los doceavos juegos de ingeniería, que el éxito este de nuestro lado.

Gracias a mis mascotas Ciel y Titán por acompañarme durante todos estos años y aunque ellos no lo sepan me han dado fuerza en momentos donde no sabía dónde encontrarla.

Gracias a Maira, por su apoyo, por seguir adelante conmigo, por ser un pilar fundamental e irremplazable en este largo proceso, por llegar juntos hasta aquí y salir victoriosos.

Gracias a mis directoras de tesis Zoraya y Doris por guiarnos y ayudarnos en todo momento, por darnos aliento y espíritu en los momentos que más los necesitábamos

Daniel

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS.	6
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
3.1. VOLCANISMO SEDIMENTARIO.	7
3.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS VOLCANES DE LODO.	9
3.1.2. CARACTERIZACIÓN Y CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA.	12
3.1.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS REGIONALES.	15
3.2. PRINCIPIOS DE TELEDETECCIÓN.	17
3.2.1. REPRESENTACIÓN DE DATOS DE UN SIG	19
3.2.2. INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES.	19
3.2.3. TIPOS DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS.	21
4. MATERIALES Y MÉTODOS	23
4.1. LOCALIZACIÓN.	23
4.2. PROCEDIMIENTO.	24
4.2.1. FASE 1: CARACTERIZACIÓN DE RASGOS GEOMORFOLÓGICOS Y REALIZACIÓN DE CARTOGRAFÍA.	25
4.2.1.1. Revisión bibliográfica.	25
4.2.1.2. Obtención de insumos.	26
4.2.1.3. Identificación de rasgos y jerarquización geomorfológica.	27
4.2.1.4. Procesamiento de insumos.	27
4.2.1.5. Procesamiento para el modelo de elevación digital (DEM)	30
4.2.1.6. Visita a campo	34
4.2.1.7. Análisis de productos:	35
4.2.1.8. Elaboración de la cartografía geomorfológica.	39
4.2.2. FASE 2: IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS	39

4.2.2.1. Inventario de eventos volcánicos en Canalete.	39
4.2.2.2. Correlación de unidades geomorfológicas y su amenaza.	40
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	41
5.1. CARACTERIZACIÓN DE RASGOS GEOMORFOLÓGICOS Y CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA.	41
5.1.1. GEOMORFOESTRUCTURA	41
5.1.2. PROVINCIA	42
5.1.3. REGIÓN	44
5.1.4. UNIDAD.	44
5.1.4.1. VOLCÁN DE LODO SAN DIEGO.	44
5.1.4.1.2. CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA DEL VOLCÁN DE LODO SAN DIEGO	46
5.1.4.2. VOLCÁN DE LODO EL PALMAR.	50
5.1.4.2.1. CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA DEL VOLCÁN DE LODO EL PALMAR	51
5.1.5. SUB UNIDADES.	55
5.1.6. COMPONENTES.	55
5.1.8. PROCESOS EROSIVOS.	67
5.2. CORRELACIÓN DE AMENAZAS	71
6. CONCLUSIONES.	89
7. RECOMENDACIONES.	91
8. BIBLIOGRAFÍA.	92
9. ANEXOS.	110

LISTADO DE FIGURAS.

Figura 1. Esquema de jerarquización geomorfológica propuesta por SGC (2012).	13
Figura 2. Localización geográfica del municipio de Canalete.	23
Figura 3. Ubicación volcanes de lodo San Diego y Palmar.	24
Figura 4. Diagrama metodológico.	25
Figura 5. Diagrama de jerarquización geomorfológica para los volcanes.	27
Figura 6. Cartografía preliminar del volcán de lodo El Palmar.	29
Figura 7. Cartografía preliminar del volcán de lodo San Diego.	30
Figura 8. Modelo de sombras.	31
Figura 9. Superposición de mapa de pendientes con transparencia de 40% sobre mapa de sombras.	31
Figura 10. Modelo de pendientes.	32
Figura 11. Puntos de Google Earth y nube de puntos en ArcGIS,	33
Figura 12. TIN	33
Figura 13. Combinación 7-4-3 para San Diego	35
Figura 14. Combinación 7-4-3 para El Palmar.	36
Figura 15. Identificación de rasgos geomorfológicos y estructurales para San Diego (Mosaico).	37
Figura 16. Identificación de rasgos geomorfológicos y estructurales para El Palmar.	38
Figura 17. Cinturones plegados del Sinú-San Jacinto	42
Figura 18. Sierras homoclinales y espolones estructurales.	42
Figura 19. Sierras homoclinales (zonas prominentes) que cuentan con la presencia de volcanes de lodo (triángulos blancos) y en donde se definen las estructuras sinclinales (líneas negras) en cuyo centro se encuentran lomeríos formados por procesos denudacionales acentuados	43
Figura 20. Representación gráfica de la morfología de sistemas volcánicos sedimentarios de tipo meseta, la zona con coloración grisácea hace referencia a la forma de acumulación de los lodos.	45

Figura 21. Alineación de filtraciones. _____	45
Figura 22. Mapa geomorfológico del volcán de lodo San Diego. _____	49
Figura 23 Representación gráfica de la morfología de sistemas volcánicos sedimentarios de tipo dómico, la zona con coloración grisácea hace referencia a la forma de acumulación de los lodos. _____	50
Figura 24. A. Ubicación de los grifos a partir de la imagen Google Earth. B. Grifos encontrados en campo. _____	53
Figura 25. Mapa geomorfológico del volcán de lodo El Palmar. _____	54
Figura 26. Depósitos de lodo en San Diego. _____	56
Figura 27. Diferentes depósitos de lodos presentes en el volcán El Palmar. _____	57
Figura 28. Grietas de desecación producto del lago salsa presente en volcán el Palmar el cual presenta una coloración y granulometría distinta al edificio volcánico en general. _____	58
Figura 29. Grifos presentes es los sistemas volcánicos estudiados, encontrándose en mayor número en el volcán San Diego (B) y solo 3 de estos en el volcán El Palmar (A). _____	59
Figura 30. Grifos sin cráter producto del secado de los lodos, provocando un taponamiento de los mismos y evitando la filtración de lodos en El Palmar. _____	60
Figura 31. Diferentes lagos salsa presentes en el sistema volcánico sedimentarios. _____	61
Figura 32. A) Cráter en forma de artesa del volcán El Palmar. B) perfil longitudinal. Fuente: Google Earth pro (CANALETE, Canalete, Córdoba). _____	62
Figura 33. Sección de ladera del volcán El Palmar. B) Perfil longitudinal de la geoforma. _____	63
Figura 34. Zona de filtraciones inactivas en El Palmar. _____	64
Figura 35. Escarpe de línea falla en el volcán El Palmar, con una altura máxima de 1,46 m. _____	65
Figura 36. Escarpe de erosión menor presente en el Volcán San Diego. _____	66

Figura 37. Fotografía satelital de Google Earth donde se aprecian acumulación de materiales formando estructuras con fisiografía distintiva resaltada en color rojo. _____	67
Figura 38. Erosión por sufusión presente en el volcán El Palmar, a medida que se alejan de la zona más alta podemos encontrar canales formados debido a la interconexión de las diferentes áreas colapsadas, en (A) canales interconectados y (B) pinping aislados. _____	68
Figura 39. Surcos presentes en el sistema volcánico sedimentario San Diego. _____	69
Figura 40. Regueros (rills) presente en el volcán San Diego, la cual posee un valor máximo de extensión de 2,47 m y una longitud mayor de 8 metros. _____	70
Figura 41. Bloques diseminados en la superficie presente en el sistema volcánico de San Diego (abajo) y El Palmar (arriba). _____	74
Figura 42. Clastos encontrados en el sistema volcánico El Palmar, distribuidos por todo el edificio volcánico. _____	75
Figura 43. Quemadas asociadas con incendios generados durante la erupción del volcán de lodo de san diego - la Lorenza del 9 de marzo de 1992. _____	76
Figura 44. Sismicidad histórica del departamento de Córdoba- Colombia _____	78
Figura 45. Diferencia de cobertura vegetal en el volcán El Palmar (A) y San Diego (B). _____	80

LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1. Lista de Insumos. _____	26
Tabla 2. Combinaciones empleadas. _____	28
Tabla 3. Valores de Pendiente. _____	32
Tabla 4. Tabla de componentes para San Diego. _____	34
Tabla 5. Tabla de componentes para El Palmar. _____	34
Tabla 6. Categorización de elementos (San Diego) _____	37
Tabla 7. Categorización de elementos (EL Palmar) _____	38
Tabla 8. Tabla de colores para ambientes morfo genéticos. _____	39
Tabla 9. Inventario de eventos Volcánicos en canaleta. _____	40
Tabla 10. Tabla de jerarquización geomorfológica volcán de lodo San Diego. _____	47
Tabla 11. Tabla de jerarquización geomorfológica volcán de lodo El Palmar. _____	52
Tabla 12. Inventario de eventos eruptivos. _____	71
Tabla 13. Matriz de amenazas. _____	83
Tabla 14. Cuadro de amenazas. _____	85

RESUMEN

Este estudio permitió la caracterización de los mayores exponentes de volcanismo sedimentario en Canalete; volcán de lodo San Diego y el volcán de lodo El Palmar, mediante la interpretación de fotografías UAV e imágenes satelitales y reconocimiento en campo, a partir de la jerarquización geomorfológica de estos dos volcanes se encontró entre los componentes principales depósitos de lodos, grifos, lagos salsa en el ambiente Volcánico Sedimentario (vl) y componentes como escarpe de erosión menor, escarpe de falla y lóbulos de soliflucción en el ambiente Estructural Denudacional (Sd), se definió en estos volcanes según la clasificación de Mazzini y Etíope (2017), la forma de meseta para San Diego y domo para Palmar. De igual manera, en base al análisis de la dinámica de estos componentes se definió que la mayor amenaza por volcanismo, se relaciona a la expulsión de material consolidado, flujos de lodo y los procesos erosivos que consigo traen, los cuales generan una mayor amenaza a los habitantes de la finca Casa Tabla, que se sitúan a una distancia de por lo menos 400 metros del volcán San Diego, para el caso de Palmar, la amenaza está dirigida a la estructura vial que está a solo metros del volcán.

PALABRAS CLAVES: Volcanismo sedimentario, geoformas, amenaza.

ABSTRACT

This study allowed the characterization of the major exponents of sedimentary volcanism in Canalete; San Diego mud volcano and El Palmar mud volcano, through the interpretation of UAV photographs and satellite images and field reconnaissance, based on the geomorphological hierarchy of these two volcanoes, we found among the main components, mud deposits, faucets, salsa lakes in the sedimentary volcanic environment (vl) and components such as minor erosion escarpment, minor erosion scarp and minor erosion scarp, salsa lakes in the Sedimentary Volcanic environment (vl) and components such as minor erosion scarp, fault scarp and solifluxion lobes in the Denudational Structural environment (Sd), it was defined in these volcanoes according to the classification of Mazzini and Ethiopian (2017), the form of plateau for San Diego and dome for Palmar. Similarly, based on the analysis of the dynamics of these components, it was defined that the greatest threat from volcanism is related to the expulsion of consolidated material, mud flows and the erosive processes they bring, which generate a greater threat to the inhabitants of the Casa Tabla farm, which are located at a distance of at least 400 meters from the San Diego volcano, for the case of Palmar, the threat is directed to the road structure that is only meters away from the volcano.

KEYWORDS: Sedimentary volcanism, geoforms, threat

1. INTRODUCCIÓN

Un volcán de lodo se constituye como una de las expresiones de diapirismo en superficie, y es considerado como una geoforma que tiene una expresión topográfica definida (SGC 2017), la presencia de estos en un área, es un indicador de mecanismos de deformación, producto de efectos de procesos tectónicos que influyen en el desarrollo de dicha geoforma (Quintero 2012).

Las amenazas geológicas asociadas a la ocurrencia de erupciones volcánicas de lodo, están relacionadas tanto al flujo de lodos que se desplazan en superficie dependiendo de la morfología del lugar, como al fracturamiento del terreno (ocurrencia de movimientos en masa locales) en los alrededores de los centros de emisión principal, lanzamiento de bloques y ocasionalmente la generación de fuego cuando los gases predominantemente de tipo metano se incendian al contacto violento con la atmósfera (SGC 2007).

El conocimiento de las geoformas de los volcanes San Diego y Palmar, objeto de estudio de esta investigación, es de gran importancia en el análisis del comportamiento volcánico sedimentario debido a que esta información es de utilidad a la hora del análisis de la dinámica del fenómeno. Es a través de la geomorfología que es posible la identificación y separación del paisaje en mapas temáticos y topográficos, no obstante, para la realización de una caracterización geomorfológica, es de gran importancia el criterio dimensional para la clasificación de geoformas, lo cual corresponde a la

división de clases según criterios como tamaño y ambientes perteneciente (Zinck 2012). Generalmente, dicha identificación puede realizarse de forma detallada a través de visitas de campo, sin embargo, las tecnologías de los sistemas de información geográfica –SIG-, con el paso del tiempo, han desarrollado métodos de calidad, que por medio de programas o sistemas de información permiten recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica necesaria para cualquier investigación de este tipo.

El incremento del uso de estos sistemas de información geográfica en la cartografía geomorfológica ha permitido la gestión rápida y eficiente de los diferentes datos contenidos en un banco informatizado, la generación de nueva información a partir de documentos cartográficos y la facilidad de establecer correlaciones entre diversos aspectos medioambientales son solo algunas de las ventajas que ofrecen estas herramientas (Sánchez 2016).

En este mismo sentido, teniendo en cuenta que esta área es intervenida por comunidades que residen y desarrollan trabajos en las cercanías del lugar y que las emisiones de gases y lodos suponen ser una amenaza para la población, debido a que los componentes de estos resultan ser nocivas a la salud humana, se busca establecer la relación entre el tipo de geoforma y la amenaza existente en el sector con el fin de que el resultado sea un documento de apoyo para la comunidad y entes territoriales y gubernamentales en los procesos de ordenamiento de territorial.

Así pues, este estudio tiene como objetivo principal la identificación de las geoformas que componen los volcanes San Diego y Palmar, por medio de la implementación de las herramientas informáticas proporcionadas por los SIG como modelos de elevación o del terreno, cuyo procesamiento y posterior resultado, facilita la identificación y análisis de los factores morfométricos y geomorfológicos de la zona de estudio, los cuales son representados en la cartografía geomorfológica a escala 1:2.000 basado en el modelo jerárquico propuesto por el Servicio Geológico Colombiano -

SGC-, en su documento; Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica En Colombia.

Este proyecto, da cumplimiento así al objetivo, mediante la ilustración de este sistema taxonómico (matriz jerárquica) en donde se evidencia los dos ambientes morfométricos presentes en las zonas de estudio; Volcánico Sedimentario y Estructural Denudacional, los cuales a su vez y siguiendo el orden taxonómico, están conformados por componentes de menor tamaño entre los que se encuentran: depósitos de lodos, grifos, lagos salsa, pertenecientes al primer ambiente y escarpe de erosión menor, escarpe de falla y lóbulos de soliflucción para el segundo ambiente; siendo este nivel de componentes el representado en el mapa final geomorfológico de los volcanes San Diego y Palmar. Así mismo, la identificación de la amenaza se relaciona a través de una matriz en relación con las características geomorfológicas de cada volcán.

Cabe resaltar, que este proyecto forma parte de una serie de investigaciones realizadas en la zona volcánica de Canalete, en donde las investigaciones realizadas a la par de este, por parte de Herazo y Torreglosa (2021) y Barros (2021), se realizaron un mayor nivel de detalle respecto a esta investigación con el fin de la mejor apreciación a nivel de filtraciones en el volcán de lodo San Diego.

2. OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

- Caracterizar geomorfológicamente mediante la utilización de sensores remotos, el volcanismo sedimentario en la zona noreste del sector la Lorenza municipio de Canalete, insumo para la identificación de la amenaza geológica que servirá como determinante del Ordenamiento Territorial, a escala 1:2.000.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar los rasgos morfológicos y estructurales de los volcanes de lodo en la zona noreste del sector la Lorenza a escala 1:2.000.
- Identificar las amenazas por volcanismo de lodo de conformidad con las características geomorfológicas en el sistema volcánico sedimentario de la zona noreste de la Lorenza-Córdoba.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. VOLCANISMO SEDIMENTARIO.

Los volcanes de lodo son manifestaciones superficiales del fluido dentro de las cuencas sedimentarias de hidrocarburos, los cuales poseen sedimentos y acumulaciones que pueden o no tener importancia comercial (Etiope et al. 2004).

Según Kopf (2000), cuando los materiales arcillosos que intruyen las rocas, se desplazan deformando la secuencia suprayacente sin salir a la superficie, se denominan diapiros de lodo, mientras, por el contrario, cuando los sedimentos finos salen través de fracturas o fallas, toman el nombre de volcanes de lodo. Este mismo autor afirma que las manifestaciones diapíricas guardan semejanza a los procesos ígneos, pues como se mencionaba anteriormente, estos se manifiestan en el registro sedimentario como cuerpos arcillosos que intruyen rocas preexistentes y salen a la superficie localmente (SGC 2017).

Pese a estas similitudes a nivel de procesos, el volcanismo sedimentario el volcanismo magmático guardan una marcada diferencia y a nivel de materiales extruidos, y es que este último emite esencialmente lava que es magma, el cual en su ascenso por la corteza terrestre alcanza la superficie recibiendo este nombre. Sin embargo, el volcanismo sedimentario se caracteriza por presentar desplazamiento de niveles muy profundos del subsuelo, los cuales van ascendiendo y penetrando sedimentos más

someros y jóvenes. Esto se produce gracias a que hay una diferencia de densidades que le permite a los materiales ascender hacia superficies menores, con un contenido de gases importante, especialmente metano. Regímenes compresivos que afectan al terreno, como los que se producen en márgenes convergentes, pueden facilitar el ascenso de estos materiales aportando presión al área.

Milkov (2000) define que las razones por las cuales se generan el volcanismo de lodo se pueden clasificar en 4 grupos distintos los cuales son, geológicos, tectónicos, geoquímicos e hidrológicos.

La ocurrencia de los volcanes de lodos no implica únicamente condiciones geológicas, sino que también debe existir una secuencia de eventos que resultan de condiciones que influyen en el crecimiento de los volcanes de lodo y por ende en su geomorfología, como son: 1) altas tasas de sedimentación y/o hundimiento de la cuenca; 2) presencia de minerales arcilloso; 3) expansión de fluidos en estratos o sistemas porosos; 4) presencia de estratos impermeables o de baja permeabilidad como roca remanente para unidades presurizadas; 5) compresión vertical o lateral de los sedimentos de la cuenca y 6) sismicidad. Okubo, (2016), Skinner, et.al (2009), Kofp (2002) y Hovland ,et.al. (1997) Achim J. (2000) cita a e.g., Ansted , (1866); Higgins y Saunders (1974); Fertl, (1976); Yassir, (1987).

Diferentes autores como Ivanov et al. (1996); Dimitrov (2003); Kholodov (2002); Skinner y Mazzini (2009) definen que la distribución y geomorfología de los volcanes de lodo se organiza ampliamente en todo el mundo en márgenes activos, como zonas de compresión de complejos de acreción, fallas de empuje y desplazamiento y márgenes pasivos que a su vez están asociados a una carga sedimentaria muy espesa, en donde se dan procesos de subsidencia alta, cuencas sedimentarias profundas relacionadas con los límites de las placas activas, así como regiones del delta. En Colombia por su parte, en la zona Caribe y en la zona norte colombiana se encuentra una concentración importante de volcanes de lodo

a lo largo del territorio que se extiende desde el golfo de Urabá hasta la bahía de Santa Marta, en el cual es posible identificar un amplio rango de tamaños que puede ir desde los pequeños volcanes de Puerto Escondido y San Antero hasta el volcán de lodo de Arboletes (Echavarría 2002).

En cuanto a la morfología que presenta los volcanes de lodo en el territorio colombiano, estas se relacionan con las con las filtraciones del área o lugar de ocurrencia, adoptada por el Servicio Geológico Colombiano (SGS) en 2017 y propuesta por Higgins y Saunders (1974), la cual se basa en las características de los cráteres y/o bocas formados debido a las diferencias de densidad, viscosidad y grado de fluidez de los materiales que emergen constantemente, junto a las estructuras alrededor de cada boca denominadas cono y la pendiente de los flancos de cada uno obteniendo así una clasificación de tipo A,B,C,D y O la cual se define para cada filtración existente en el sistema volcánico sedimentario, pero no para el sistema completo como tal, resaltando, que a nivel internacional existe diferentes clasificaciones.

3.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS VOLCANES DE LODO.

Milkov (2000); Kofp (2002) y Wan, Z Yao, et al (2018), establecen que mayoría de los esquemas de clasificación de los volcanes de lodo se basan en la morfología de la superficie, el tamaño, las características de desarrollo y la cinética, la cuales se adaptan a estructuras muy grandes de hasta 100km² en área, hasta pequeños accidentes geográficos de menos de 1m².

En relación a lo anterior, la clasificación que se presenta a continuación indica las características definidas por Mazzini (2009, 2017), y Etiope (2017), de conformidad con 12 geofomas diferentes o tipos de volcanes de lodo que son: cónica, alargado, multicrater, forma de domo, cuello rígido,

forma de pantano, forma de meseta, cráter de impacto, crecimiento como diapiro, flancos de subsidencia, forma de sifón y estructuras de subsidencia.

- **Cónica:** Son aquellos volcanes de lodo que presentan una morfología en forma de cono que muy similar a la de muchos volcanes magmáticos clásicos los cuales presentan una forma circular con flancos de gran altura formados por la acumulación de lodos.
- **Alargado:** caracterizado por estar fuertemente afectado por características tectónicas (p. ej., fallas, anticlinales) que controlan el colapso de la estructura, así como las vías para los fluidos que se filtran en la superficie.
- **Multicrater:** No poseen ningún cráter definido, su forma es irregular y son resultado de los flujos de corrientes de diferentes sitios de erupción.
- **Forma de domo:** Tienen morfología de domo, además de poseer una forma lisa que muestra evidencia de flujos recientes de barro que se extienden radialmente desde el cráter
- **Cuello rígido:** Presenta una forma semejante a los troncos cortados debido al resultado de múltiples extrusiones de arcilla y arena que fluyen a través de la superficie arcillosa del volcán de lodo.
- **Forma de pantano:** Posee elevación muy baja caracterizada por la erupción de agua rica en barro de grano fino, donde la viscosidad del material en erupción no permite la construcción de edificios y el volcán de lodo se desarrolla lateralmente desde un cráter central.
- **Forma de meseta:** Son estructuras con una elevación relativamente baja y flancos relativamente empinados y estrechos con una gran superficie plana ocupada por el cráter

- **Cráter de impacto:** se produce después de potentes explosiones capaces de eliminar los sedimentos alrededor del cráter, obteniendo una forma muy semejante a las estructuras formadas por los impactos de meteoros en otros planetas.
- **Crecimiento como diapiro:** Se caracteriza por estar constantemente extruyendo brechas de lodos de gran densidad a través del cráter a razón de varios metros al año, por lo cual suelen tener una elevación significativa debido al material extruido muy compacto, rígido y difícil de erosionar, logrando ocultar de manera parcial el cráter donde aflora el material.
- **Flancos de subsidencia:** Se caracterizan por el hundimiento gradual de los flancos debido a la enorme carga de lodos del propio volcán, donde esta forma es más común en los volcanes presentes en zonas litorales o en el fondo marino.
- **Forma de Sifón:** Consiste en una gran depresión que contiene los flujos de lodos existentes ocupando todo el cráter, normalmente no muestra ninguna elevación y toda la estructura parece esencialmente un sumidero, los mecanismos de este tipo de estructuras no están bien estudiados y se especula que se produce por el colapso de los canales por donde fluye el lodo a la superficie.
- **Estructuras de subsidencia:** Este tipo de morfología ocurre por el hundimiento gradual en el área del cráter y la región alrededor de todo el volcán de lodo, por lo tanto, el volcán de lodo tendrá una elevación típicamente muy baja y la zona del cráter estará ocupada por los elementos expulsados.

3.1.2. CARACTERIZACIÓN Y CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA.

La geomorfología, es ante todo una ciencia de observación, persiguiendo la identificación y separación de paisajes a partir de mapas topográficos, modelos digitales de elevación o de terreno, documentos de sensoramiento remoto, pero principalmente por lectura de los rasgos fisiográficos. Existen diferentes consensos aceptados y utilizados para referirnos a el vocablo de geoformas, donde está posee el concepto genérico que designa todos los tipos de formas del relieve independientemente de su origen, dimensión y de su nivel de abstracción (Zinck, 1988; Zinck & Valenzuela, 1990) citado por Zinck en Geopedología (2012).

Es importante tener en cuenta que la morfología de los volcanes de lodo es variable ya que está definida por fenómenos tectónicos, geológicos, climáticos e hidrológicos junto con las características fisicoquímicas de los materiales que afloran de los mismos. Según Zinck, (1998), en la estructura de un sistema taxonómico de geoformas existe una serie de niveles categóricos que se deducen fundamentalmente de la expresión fisiográfica con nombres propios debido a que pertenecen a un determinado contexto nacional o regional, la cual define el sistema taxonómico de las geoformas.

En Colombia cada entidad realiza una cartografía geomorfológica con escalas diferentes puesto se usa para diferentes propósitos, por lo cual se han propuestos categorizaciones con relación a las diferentes adaptaciones de diferentes metodologías geomorfológicas internacionales, por ejemplo el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) utiliza una adaptación de la metodología del ITC por parte de Verstapen y Van Zuidam, por otro lado el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales (IDEAM) utiliza como criterios de diferenciación la morfogénesis y los procesos geomorfológicos actuales, relacionadas directamente con las características morfoclimáticas actuales, la cual es fundamentada por la metodología francesa de Tricart, (1977) y Flórez de (1988).

Particularmente el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en sus estudios de evaluación del medio ambiente y ordenamiento territorial utiliza una adaptación de las metodologías mencionadas anteriormente, como resultado ha propuesto una jerarquización de las geoformas en relación a la escala del trabajo con una subdivisión geomorfológica correspondiente a cada una, la cual unifica los criterios de estandarización de la información que se obtendrá en los estudios, siguiendo los lineamientos de la metodología del ITC, lo cual queda plasmado en la siguiente figura (Ver figura 1). (Carvajal 2012)

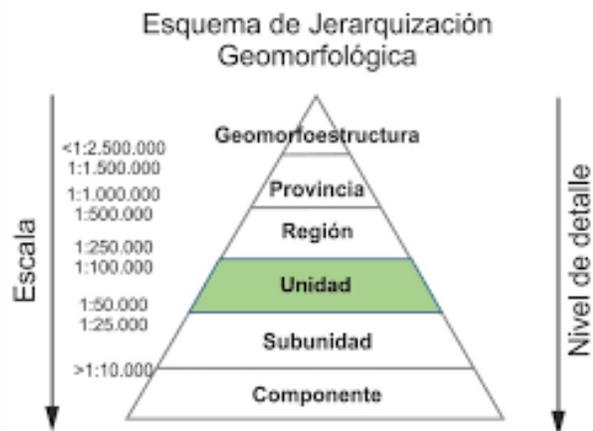


Figura 1. Esquema de jerarquización geomorfológica propuesta por SGC (2012).

Fuente: SGC.

- **Geomorfoestructura:** Hace referencia a áreas geográficas de grandes o amplios espacios continentales o intracontinentales definidos por estructuras geológicas y topográficas regionales que han tenido deformación o basculamiento y posiblemente metamorfismo o intrusión ígnea (Megageoformas de origen tectónico). (SGC 2012).
- **Provincia Geomorfológica:** Regiones que presentan geoformas parecidas, definidas a nivel regional. Localmente abarcan las regiones naturales y terrenos geológicos de Colombia, los cuales están delimitados por fallas de importancia regional -definidas o inferidas-.

Incluyen los cinturones montañosos, llanuras, cordilleras y serranías (SGC 2012).

- **Región Geomorfológica:** Involucra a las geoformas relacionadas a la génesis de los paisajes, y definidas por un marco de ambiente morfogenético definido y afectados por procesos dinámicos parecidos como condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas, los cuales se agrupan en:
 - ✓ *Ambiente morfoestructural (s):* Geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente la asociada a plegamientos y fallamientos.
 - ✓ *Ambiente volcánico (V):* Definido para geoformas generadas tanto por la intrusión como por la extrusión de materiales provenientes del interior de la tierra.
 - ✓ *Ambiente Denudacional (D):* Definido por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales, y producto de procesos de meteorización, erosión y remoción en masa sobre geoformas preexistentes.
 - ✓ *Ambiente fluvial y lagunar (F):* Corresponde a los procesos (erosión-sedimentación) producto de las corrientes de agua.
 - ✓ *Ambiente glacial (G):* Definido por las geoformas originadas por los glaciares tanto continentales como de alta montaña.
 - ✓ *Ambiente eólico (E):* Corresponde a las geoformas erosivas y de acumulación sedimentaria por acción de los vientos.
 - ✓ *Ambiente Kárstico (K):* Definido por las formas del terreno, producto de la meteorización dilución de rocas.
 - ✓ *Ambiente antropogénico (A):* Corresponde a las formas del terreno producto de la actividad del hombre.
- **Unidad geomorfológica:** Se propone como unidad geomorfológica básica cartografiable. Se define como una geoforma individual genéticamente homogénea, generada por un proceso geomórfico construccional o destruccional típico de un dado ambiente morfogénico (SGC 2012).

- **Subunidad geomorfológica:** Corresponde a subunidades de las unidades geomorfológicas, determinada por los constantes morfológicos y morfométricos que relaciona el tipo de material o disposición estructural de estos respecto a la topografía del terreno. También está definida por el contraste dado por las formaciones superficiales asociadas a procesos como meteorización, erosión, transporte y acumulación (SGC 2012).
- **Componente o elemento geomorfológico:** Representa el máximo nivel detalle. Abarca los rasgos del relieve (escarpes naturales o antropogénicos, relieves internos de laderas o flancos crestas, formas de valle, etc.) definidos en sitios puntuales y determinados por la morfometría detallada del terreno en una subunidad geomorfológica; también puede estar definida por microrelieves asociados a una característica litológica (SGC 2012).

3.1.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLÓGICAS REGIONALES.

La región del Caribe colombiano en el marco regional y geomorfológico, está ligada en su origen a la placa Caribe y la interacción de las placas de Cocos y sudamericana (SGC). En esta zona, existen rasgos estructurales y geomorfológicos muy marcados, los cuales son evidencia de la interacción de estas placas (Quintero 2012).

El complejo volcánico de Canalete, se encuentra formado por dos de los volcanes más importantes de la zona; el volcán de lodo San Diego y el volcán de lodo El Palmar, estos se encuentran ubicados regionalmente en el llamado sinclinorio de Abibe - Las Palomas, el cual hace parte de la provincia geológica denominada como Cinturón del Sinú, el cual es una franja de rocas sedimentarias con edades que varían desde el oligoceno hasta el plioceno y se extiende desde el golfo de Urabá hasta Barranquilla (SGC 2018), e incluye zonas continentales y submarinas (plataforma y

talud continentales) las cuales limitan desde el suroeste con la falla Uramita, al oeste con el lineamiento de Colombia y al este con el lineamiento del Sinú, según Carvajal (1999) esta última influye en el proceso sedimentarios por lo cual el material posee características plásticas asociadas especialmente a arcillas, sometida a altas presiones en profundidad genera levantamiento del terreno.

La característica principal de la provincia del Cinturón del Sinú en esta región, es la ocurrencia de fallamiento de rumbo dextral y sinistral de dirección NWW – SEE. esta disposición estructural determina la conformación de bloques que dislocan las estructuras sinclinales de dirección NNE. Entre las fallas que se destacan en la zona de estudio, se encuentran: las fallas El Ébano (Sinistral) por el sector norte, inmediatamente al sur la falla de Canalete (Dextral) y la falla San Juan (sinistral). La región donde se encuentra el complejo volcánico, está limitada al Norte por la falla de Canalete dextral de dirección NWW la cual se asocia con fallas sintéticas de rumbo de dirección NW, las cuales son conjugadas posiblemente dextrales de la misma (SGC 2018).

Los volcanes de lodo San Diego y El Palmar se encuentran emplazados entre sierras homoclinales, espolones estructurales y lomos de falla constituidos de areniscas y arcillolitas de la formación Pajuil, que definen el cierre del sinclinal de Popayán por el costado NW del municipio de Canalete. Estas geformas han sido generadas a través del tiempo, tanto por argilogénesis y diapirismo de lodo, como por compresión lateral asociada con la tectónica de placas definida esta última, por la interacción tangencial entre las placas de Nazca, Caribe y Suramericana (SGC 2018).

Las sierras homoclinales se caracterizan por estar afectadas por fallamiento y presentar en sus cimas manifestaciones de volcanismo de lodo. Los volcanes de lodo en esta región presentan configuraciones irregulares en vista de planta y tienen diámetros entre 600 y 1250 m, y alturas promedio de 50 – 60 m, siendo el más grande el volcán de lodo de El Palmar con

1650 m de diámetro y con dos centros de emisión alineados en dirección NE. En general se caracterizan por presentar una morfología plana amplias hacia el tope con artesas a manera de cráter de aproximadamente 200 m de diámetro en donde se localizan los flujos de lodo más recientes. (SGC 2017).

El sistema fallado en la región, está formado por varios ramales, aunque no se ha definido su geometría, parecen ser de carácter de rumbo dextral con componente inversa, el cual está asociado con un fallamiento sinistral normal de dirección NW, localmente relacionado con la ubicación de los volcanes de lodo por este sector (SGC 2018).

Los ambientes morfogenéticos en el municipio de Canalete, según los lineamientos de jerarquización geomorfológica propuestos por Carvajal (2012) son 3 categorías corroborado con la información cartográfica presentada en la Plancha 60 según el SGC: Estructural (S) que incluye el volcanismo de lodo (Sv1), Denudacional (D), Fluvial (F).

3.2. PRINCIPIOS DE TELEDETECCIÓN.

Con el desarrollo de la tecnología se han considerado los sensores remotos el marco de estudio de la teledetección, la cual se define como la técnica que nos permite obtener información de los objetos en la superficie terrestre, para lo cual es necesaria la interacción entre el sensor remoto y dicho objeto. (Chuvienco 1995). Los sensores son dispositivos que captan la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre usando mediciones del espectro electromagnético con el fin de caracterizar la cobertura terrestre (Rodríguez y Arredondo 2005). De este modo, los principales elementos de un sistema de teledetección son: sensor, objeto observado y flujo energético.

En la actualidad, la interacción entre los datos de los sensores remotos en un Sistema de Información Geográfica (SIG) produce un banco de datos multivariantes y multitemporales que posibilitan una configuración numérica del paisaje, lo que nos permite tener una representación digital del terreno (Sacristan 2006). Esta interacción provoca en los objetos diferentes valores radiométricos que son reflejados en tonalidades de gris en imágenes monocromáticas o coloraciones diferentes en composiciones en falso color o RGB (Hernández 2008).

Como se sabe, la radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos que se propagan en forma de onda transportando consigo energía, cuando esta radiación incide sobre un cuerpo, una parte de esta es reflejada y el resto es transmitida, absorbida o dispersa, los sensores miden la cantidad de radiación reflejada por el cuerpo (CONAE). Las reflectividades de los objetos de la superficie en cada banda espectral son representadas en bandas distintas pudiendo realizar composiciones en color, combinando tres bandas principales, a las cuales se les asigna los colores primarios azul, verde y rojo (RGB) (Martínez y Martín 2010).

Se denomina espectro electromagnético a la distribución de estas ondas electromagnéticas a partir del cual, la energía registrada es la fuente para la obtención de los datos de la superficie terrestre. En los sensores remotos es común clasificar las ondas electromagnéticas en función de su posición y tamaño dentro del espectro (Tempfli, K., et al 2009). Los objetos del mundo real son reflejados y visualizados distintamente en cada rango del espectro electromagnético en rangos espectrales como: rayos cósmicos, rayos gamma, rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo, microondas y radio y televisión. (Hernández 2008).

3.2.1. REPRESENTACIÓN DE DATOS DE UN SIG

Estas representaciones se dividen en dos tipos (Medina 2014)

- **Discretos:** Representan objetos en los sistemas de almacenamiento de datos ráster y de entidad. Su principal característica es que poseen límites conocidos y definibles, es decir, se puede definir con facilidad donde comienza y termina el objeto.
- **Continuos:** Representan fenómenos en los que cada ubicación en superficie es medida a través del nivel de concentración o relación de un punto fijo en el espacio o fuente de emisión (Universidad de la Republica Uruguay 2018).

Así mismo, se presentan dos maneras de almacenamiento de dichos datos;

- **Tipo ráster:** Cualquier imagen digital formada por celdas o cuadrículas (píxeles) al cual a cada uno le corresponde un único número, aportando así información necesaria para modelizar el aspecto del medio y tipo vectorial. Este modelo de representación se basa en las propiedades del espacio, con valores como uso de suelo, temperatura o nulo de ser el caso. Los datos ráster pueden almacenarse en formatos TIFF, JPEG, etc.
- **Tipo vectorial:** Expresa características geográficas, manteniendo las características geométricas de las figuras, su principal enfoque es la precisión en la localización de los elementos en el espacio. Esta información puede ser utilizada para crear un mapa que describa un atributo particular contenido en la base de datos (Gallego y Ventura 2019).

3.2.2. INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES.

Para la realización de un proceso de fotointerpretación es necesario considerar parámetros que ayuden a la identificación de rasgos geológicos y morfológicos de forma general, entre los que tenemos:

Tonalidad: Tanto para imágenes de satélite como para fotografías, este parámetro hace referencia a la intensidad relativa de la luz reflejada por el terreno. Es un valor relativo pero que juega un papel importante en la identificación de rocas; es importante resaltar que la evaluación de la tonalidad consiste en comparar el tono en varias imágenes.

- **Tono claro:** Nieve, agua reflejando luz, nubes, olas, evaporitas, caliche, barreal, ciertas arenas y gravas, dunas, ciertas tobas, algunos rasgos de alteración hidrotermal (talco, amianto), corales, cuerpos cuarzo-feldespáticos, diques ácidos, pegmatitas, ciertas cuarcitas y calizas.

- **Tono mediano:** Yeso, rocas calcáreas y dolomíticas, areniscas claras, arcillitas, lutitas, limolitas, margas, intrusivas y efusivas leucocráticas y básicas.

- **Tono gris oscuro:** Sombra de lagos y cursos de agua, césped, carbón, areniscas y Lutitas rojas, grauvacas oscuras, areniscas con contenido orgánico, rocas intrusivas, efusivas, básicas y ultrabásicas.

Textura: Este parámetro presenta la frecuencia de cambio de tonalidad, en síntesis, es un agregado de rasgos individuales bastante pequeños para ser distinguidos en forma particular. Es muy importante tener en cuenta la escala, dependiendo de los elementos que causan el cambio de tono, la textura puede tener un aspecto: grueso, fino, uniforme, áspero, liso, granular, lineado, esponjoso, moteado, bandeado.

Forma del relieve y topografía: Está relacionada con la escala de trabajo y son factores que ayudan a identificar rasgos geológicos dado que estos están relacionados íntimamente con geformas geológicas como abanicos, domos, conos, pliegues entre otros (SGC 2015).

Tamaño: Se determina por la medida de un objeto, permite reducir de su consideración gran parte de las posibilidades de identificación de los diferentes elementos. El tamaño de los objetos en las imágenes se tiene que considerar siempre en el contexto de la resolución espacial y de la escala

en la que está impresa o desplegada la imagen. Igualmente es importante relacionar el tamaño del objeto analizado con otros objetos.

Sombras: Se define como el espacio de oscuridad obstaculizada por un objeto, este parámetro ayuda al intérprete en la identificación de los diferentes tipos de relieve y las coberturas presentes sobre estos (IGAC 2017).

3.2.3. TIPOS DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS.

Esta metodología tiene como objetivo el análisis geomorfogenético que incluye aspectos como la estructura geológica del territorio, morfología, morfometría, geomorfocronología, y la morfodinámica. Así, según el objetivo, con los lineamientos de la metodología del ITC, tenemos:

Mapas geomorfológicos analíticos: Proporcionan información del relieve y de los procesos con énfasis en la morfogénesis y la morfocronología, incluyendo información geológica (litológica y estructural).

La morfogénesis se representa en forma de unidades geomorfológicas: polígonos coloreados y rotulados con letras; las unidades morfogenéticas están coloreadas de acuerdo al ambiente morfogenético.

La litología se indica por medio de las tramas adoptadas para la cartografía geológica, pero en colores apagados.

La morfología y los rasgos de superficie del terreno se representan por medio de símbolos y flechas que apuntan hacia la parte baja de la ladera.

La información morfométrica se representa usando varios matices de colores o por símbolos con datos obtenidos en campo.

Los procesos morfodinámicos se representan por símbolos o flechas de formas o estilos diferentes indicando la dirección del movimiento.

Mapas geomorfológicos sintéticos: Proporcionan información general del terreno, toma la información suministrada por los mapas geomorfológicos analíticos y la relacionan con otros factores dinámicos del paisaje (clima, suelos, hidrología y vegetación). En este tipo de mapas la información se puede agregar resumidamente en la leyenda.

Mapas geomorfológicos pragmáticos: Mapas de investigación geomorfológica con un propósito definido como brindar información de amenazas y riesgos naturales o planificación del territorio. Para tal efecto se emplea la información suministrada por los mapas analíticos y sintéticos; el primero define las unidades de mapeo geomorfológico y aporta información detallada y el segundo proporciona el contexto ambiental y las interacciones ecológicas del paisaje geomorfológico.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. LOCALIZACIÓN.

El Municipio de Canalete está ubicado al Noroeste del Departamento de Córdoba entre los paralelos 8° 30' y 9° 10' de latitud norte y los meridianos 76° 15' y 76° 25' de longitud occidental (Figura 2). Este Municipio se caracteriza por tener un clima tropical variado con una temperatura promedio de 28°C, posee una extensión de 483 km² es decir 48.000 mil hectáreas que corresponden al 1.5% del territorio departamental (EOT Canalete).

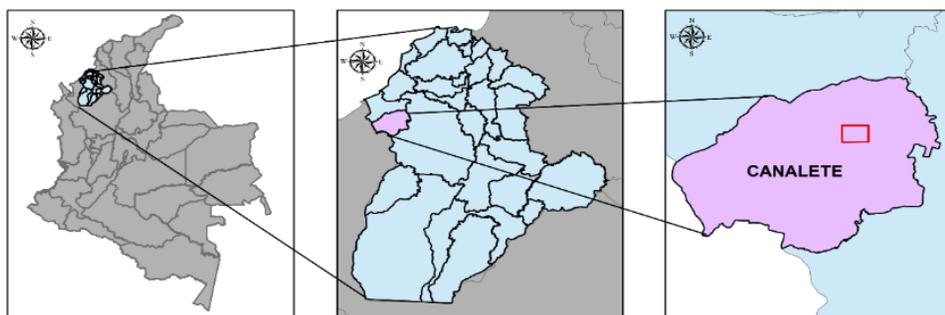


Figura 2. Localización geográfica del municipio de Canalete.

Fuente. Este estudio.

En este municipio se encontraron dos zonas afectadas por volcanismo de lodo distantes una del otro aproximadamente 1 km. El primer volcán recibe el nombre de San Diego, este se localiza en el corregimiento Lorenza y el segundo recibe el nombre de El Palmar, y está ubicado en el corregimiento El Guineo (figura 3).

los volcanes presentan un área de afectación de aproximadamente 24 hectáreas de extensión (250 metros de radio desde el centro del volcán). Estos volcanes se localizan en los alrededores de la finca Casa Tabla, aproximadamente 6 km al noreste de Canalete y/o 3 km al occidente del corregimiento El Guineo (INGEOMINAS 2001)

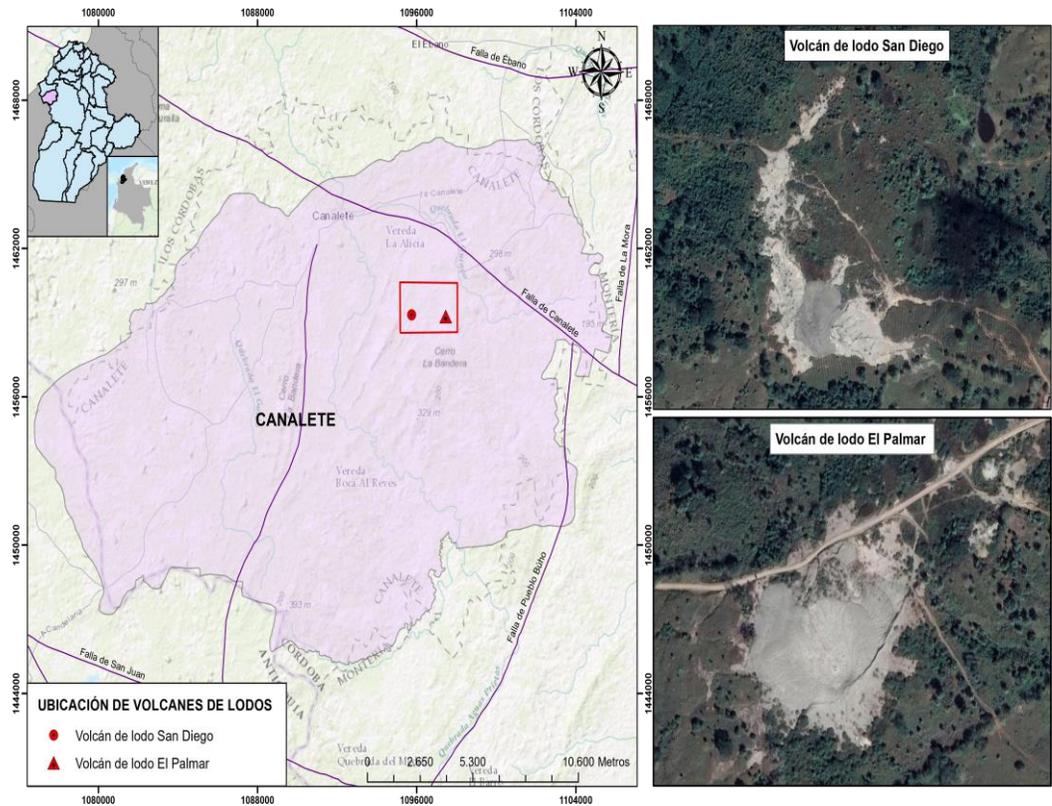


Figura 3. Ubicación volcanes de lodo San Diego y Palmar.
Fuente. Este estudio.

4.2. PROCEDIMIENTO.

Para la elaboración de este trabajo se aplicaron los principios de la metodología planteada por Carvajal (2012) en su documento *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*, el cual recoge los lineamientos de la metodología del ITC para la elaboración de cartografía geomorfológica y donde se propone el sistema de jerarquización geomorfológica, teniendo en cuenta los rasgos de clasificación de mayor a menor área.

A su vez, se aplicaron los lineamientos de procesamiento e interpretación de imágenes de satélite establecido en la propuesta metodológica del IGAC (2017), utilizando como herramienta las plataformas SIG, así como implementación de técnicas de fotointerpretación y una visita a campo.

La metodología planteada cuenta con fases representadas en la figura 4:

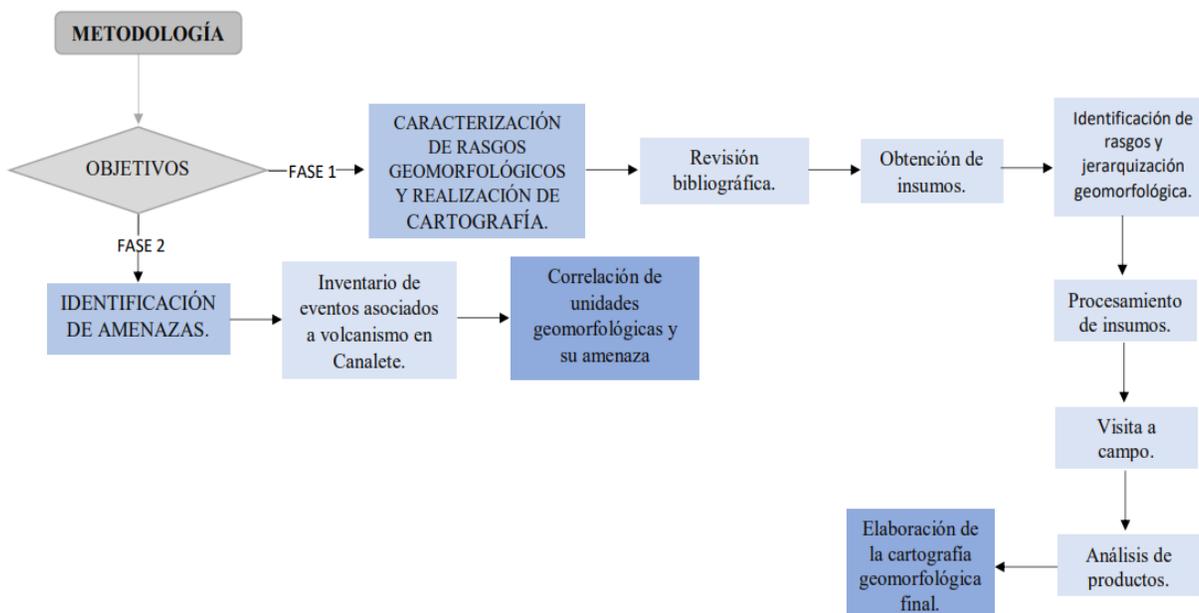


Figura 4. Diagrama metodológico.
Fuente. Este estudio.

4.2.1. FASE 1: CARACTERIZACIÓN DE RASGOS GEOMORFOLÓGICOS Y REALIZACIÓN DE CARTOGRAFÍA.

4.2.1.1. Revisión bibliográfica.

Esta etapa consistió en una revisión de literatura asociada al volcanismo de Iodo, donde destacan autores que han realizado grandes contribuciones en este campo como Adriano Mazzini A; Giuseppe Etiope, Alexei V. Milkov; Achim J. Kopf, entre muchos otros, de igual forma se realizó una pesquisa del uso de sensores remotos y su eficacia para la identificación,

caracterización e identificación del paisaje, transformación del entorno y amenazas asociadas al volcanismo de lodo.

4.2.1.2. Obtención de insumos.

Una vez que se obtuvo una recopilación de esta información, se procedió a la obtención de los insumos que fueron procesados en el programa ArcGIS, las herramientas utilizadas fueron el registro de imágenes de Google Earth, imágenes aéreas del volcán San Diego - La Lorenza proporcionadas por la corporación autónoma regional valles del Sinú y San Jorge (CVS), Imagen satelital de Worldview-3 del año 2019 y el modelo de elevación digital Alos Palsar, las cuales quedan sintetizadas en la tabla 1.

Tabla 1. Lista de Insumos.

INSUMOS		CARACTERÍSTICAS
DE SISTEMA	Software	ArcGIS Versión 10.3.1, extensiones 3D Analyst y Spatial Analyst.
TÉCNICOS	Imágenes aéreas del volcán San Diego	Año de recopilación 2017.
	Imágenes Google Earth	Año 2014 – 2017.
	Imagen Wordview 2	Resolución de 0.3 metros en la banda pancromática y 1.3 metros para sus 8 bandas multiespectrales.
	DEM	Alos Palsar de 12.5 m.
DE APOYO	Cartografía	Mapa geológico de Córdoba, mapa geomorfológico de Córdoba.

4.2.1.3. Identificación de rasgos y jerarquización geomorfológica.

Teniendo en cuenta la revisión de literatura, la ubicación geográfica, la geología y geomorfología de la zona de estudio, se definieron los rasgos a identificar en las imágenes recopiladas de los dos volcanes, cuya clasificación jerárquica relacionó los rasgos definidos clasificándolos en función de su tamaño y características morfológicas según lo planteado por el Servicio Geológico Colombiano, como se muestra en la figura 5:



Figura 5. Diagrama de jerarquización geomorfológica para los volcanes.
Fuente. Este estudio.

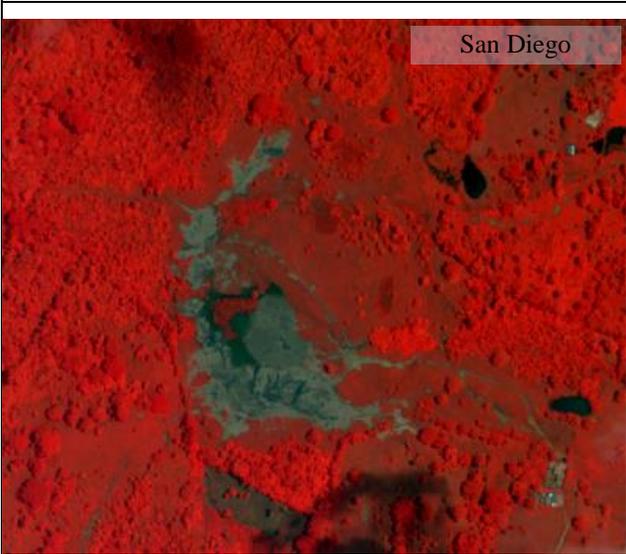
4.2.1.4. Procesamiento de insumos.

I. *Georreferenciación*: este proceso permitió determinar la posición de un elemento en un sistema de coordenadas espacial diferente al que se encuentra, esto implica la alteración del valor, forma y asignación del pixel en la imagen. Los insumos utilizados fueron previamente

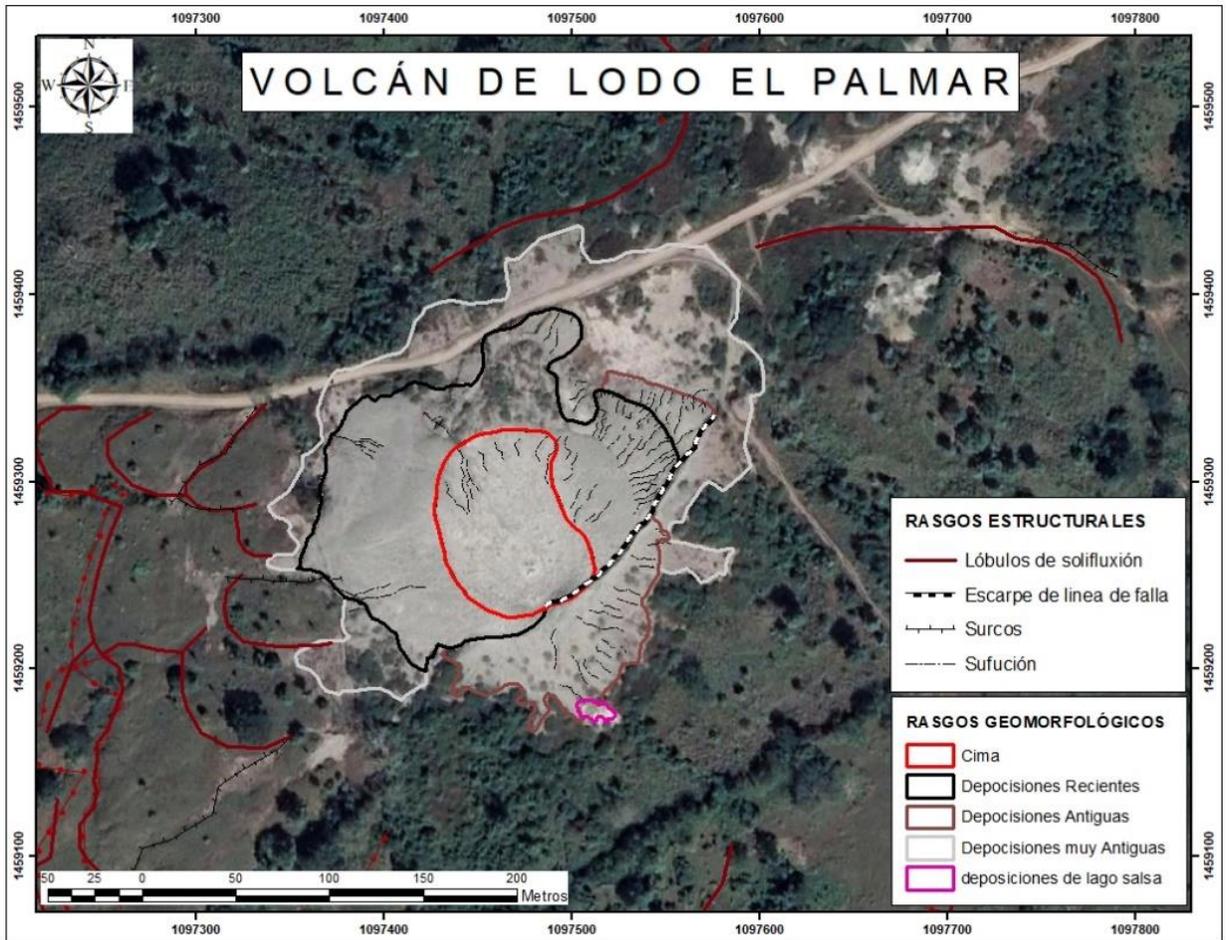
georreferenciados y proyectados al sistema de coordenadas WGS_1984_UTM_zone_18N el cual es el sistema de proyección que poseen las imágenes satelitales obtenidas de Worldview-3, posterior a este procesamiento, estos fueron reproyectadas al sistema de coordenadas local: MAGNA_Colombia_Oeste.

- II. *Combinación de bandas*: se empleó la técnica de combinación de bandas para la identificación de rasgos morfológicos, coberturas y rasgos estructurales en la zona (Tabla 2).

Tabla 2. Combinaciones empleadas.

IMAGEN	COMBINACIÓN
 <p data-bbox="393 821 581 871">El Palmar</p>	<p data-bbox="1045 821 1469 968">Combinación 4-3-2: con esta combinación se aprecia el color verdadero de las zonas de estudio.</p>
 <p data-bbox="803 1304 1019 1354">San Diego</p>	<p data-bbox="1045 1304 1469 1745">Combinación 7-4-1: la banda 7 en rojo, cubre el segmento del espectro electromagnético en el que los minerales arcillosos absorben la energía; la banda 4 en verde, cubre el segmento en el que la vegetación refleja fuertemente; la banda 1 en azul, abarca el segmento en el cual los minerales absorben energía. Se obtiene de esta combinación el área de influencia de los lodos.</p>

III. *Análisis de insumos*: se identificaron sobre los insumos los rasgos morfológicos previstos a nivel de subunidad, obteniendo así, una cartografía preliminar con los principales componentes de los volcanes (figura 6 y figura 7):



*Figura 6. Cartografía preliminar del volcán de lodo El Palmar.
Fuente. Este estudio.*

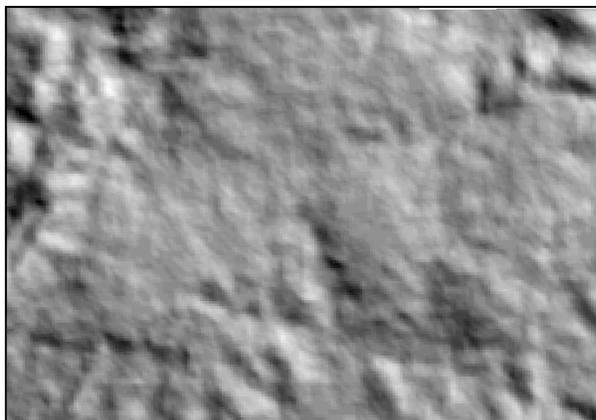


*Figura 7. Cartografía preliminar del volcán de lodo San Diego.
Fuente. Este estudio*

4.2.1.5. Procesamiento para el modelo de elevación digital (DEM):

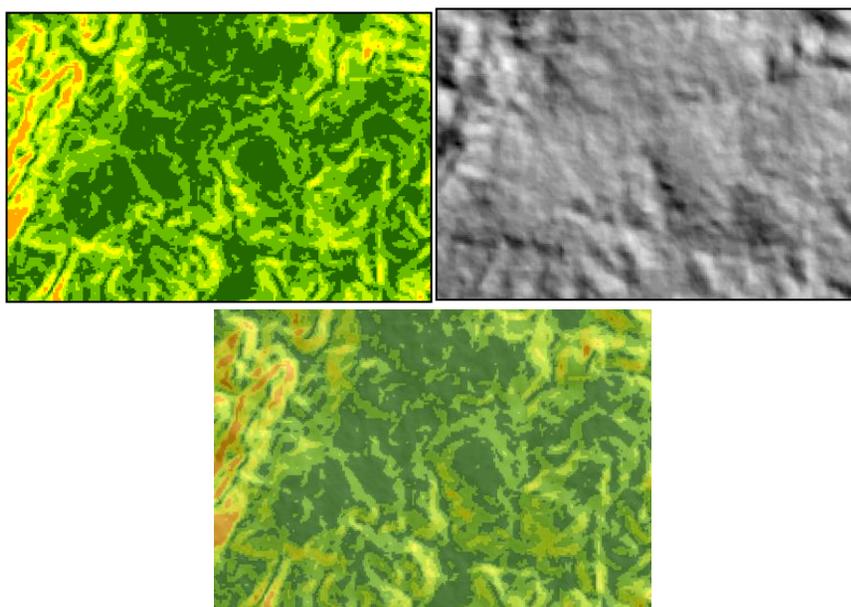
El modelo digital del terreno usado en este estudio, se empleó para el control e identificación geomorfológica de la región, así como también su funcionalidad se aplicó a la comprobación de las pendientes en la zona a través de la función de superposición de mapas.

I. Modelo de Sombras: esta herramienta permitió visualizar de mejor manera formas del relieve permitiendo resaltar elementos geomorfológicos y estructurales de la región (figura 8):



*Figura 8. Modelo de sombras.
Fuente. Este estudio.*

Una de las mejores utilidades para esta herramienta fue superponer a la capa de sombras otra con una transparencia de 40% la capa de pendientes como se muestra en la figura 9:



*Figura 9. Superposición de mapa de pendientes con transparencia de 40% sobre mapa de sombras.
Fuente. Este estudio.*

II. Pendientes: el modelo de pendientes (figura 10) es una variable cuantitativa y continua derivada del DEM, esta capa fue reclasificada de acuerdo a los valores establecidos por el SGC presentados en la tabla 3:

Tabla 3. Valores de Pendiente.

<i>Inclinación</i>	<i>Descripción</i>
<i><5°</i>	<i>Plana o suavemente inclinada</i>
<i>6 - 10°</i>	<i>Inclinada</i>
<i>11 - 15°</i>	<i>Muy inclinada</i>
<i>16 - 20°</i>	<i>Abrupta</i>
<i>21 - 30°</i>	<i>Muy abrupta</i>
<i>31 - 45°</i>	<i>Escarpada</i>
<i>>45°</i>	<i>Muy escarpada</i>

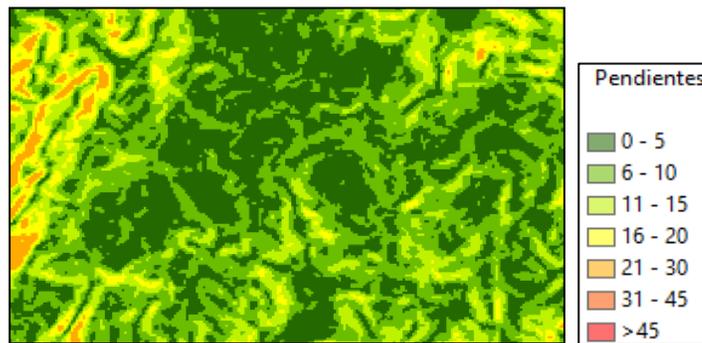
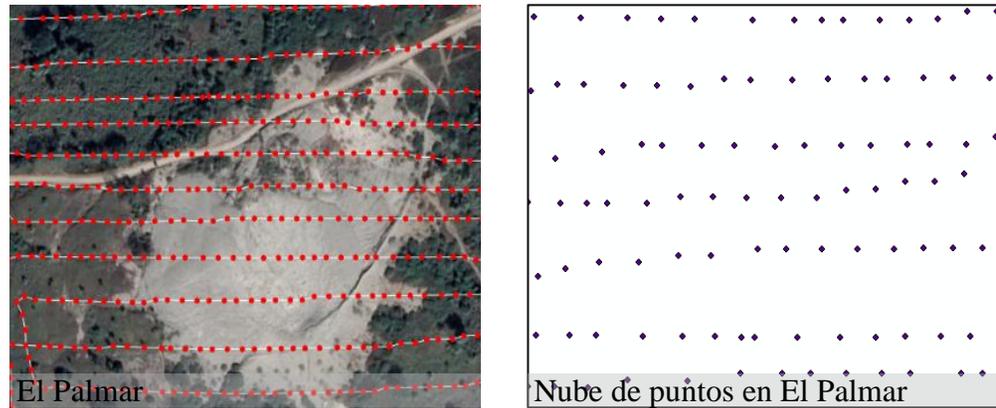


Figura 10. Modelo de pendientes.
Fuente. Este estudio.

III. TIN: esta herramienta se constituyó como medio digital para representar la morfología de la superficie mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). El proceso a realizar para la obtención del TIN se llevó a cabo a partir de una capa de puntos obtenida mediante la creación de una ruta en Google Earth, esta presentó información de elevación necesaria para la creación del TIN (Figura 11):



*Figura 11. Puntos de Google Earth y nube de puntos en ArcGIS,
Fuente. Este estudio.*

Una vez obtenida la capa de puntos en el programa haciendo uso de la herramienta 3D Analyst Tools se procede a crear el TIN mostrado en la figura 12:



*Figura 12. TIN
Fuente. Este estudio.*

IV. Perfiles topográficos: estos perfiles mostraron el cambio en la elevación de una superficie a lo largo de una línea. Se usó la capa TIN para la interpolación de una serie de líneas que se trazaron en los Volcanes San Diego y EL Palmar para la obtención de los gráficos de perfil.

4.2.1.6. Visita a campo

Posterior al procesamiento de insumos y clasificación jerárquica de los rasgos encontrados, se realizó una visita a campo para la corroboración de la información obtenida. En esta visita, se comprobó mediante prácticas de observación la veracidad de la cartografía preliminar, encontrando los rasgos a nivel de subunidad (definidos en la figura 5) en cada una de las unidades evaluadas, así como también se definieron rasgos de menor tamaño, denominados componentes, que conforman dichas subunidades como se muestran en las tablas 4 y 5:

Tabla 4. Tabla de componentes para San Diego.

SUBUNIDAD	COMPONENTES
Depósitos de lodo	Depósitos de lodos antiguos
	Depósitos de lodo reciente
Cima plana levemente ondulada	Grifos
	Lagos salsa
Laderas	Laderas inclinadas
	Laderas plana o suavemente inclinadas
Escarpe de erosión menor	Escarpe de erosión menor
Lóbulos coluviales y de solifluxión	Lóbulos coluviales y de solifluxión

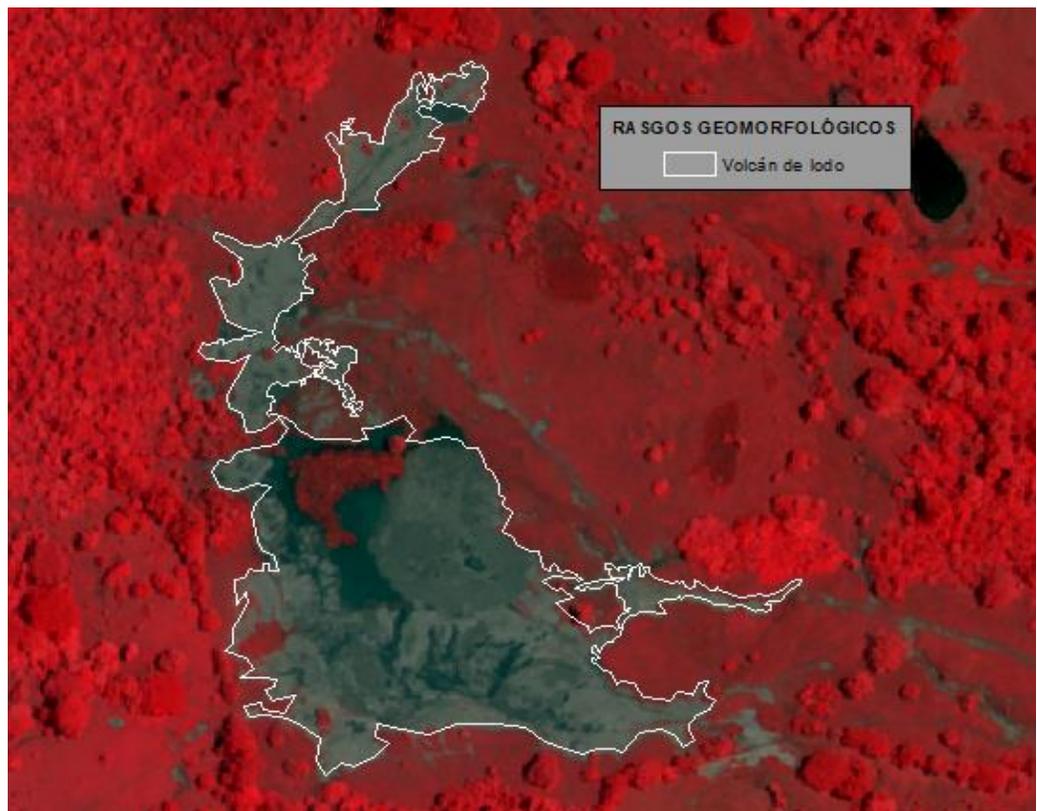
Tabla 5. Tabla de componentes para El Palmar.

SUBUNIDAD	COMPONENTES
Depósitos de lodo	Depósitos de lodos muy antiguos
	Depósitos de lodo antiguos
	Depósitos de lodo recientes
	Grietas de desecación.
Cima	Cráter en forma de artesa
	Lago salsa
Grifos	Grifos cementados
	Grifo activo
Laderas volcánicas	Laderas inclinadas
	Laderas muy inclinadas
	Laderas abruptas
	Filtraciones inactivas
Escarpe	Escarpe de línea de falla
Lóbulos de solifluxión	Lóbulos de solifluxión

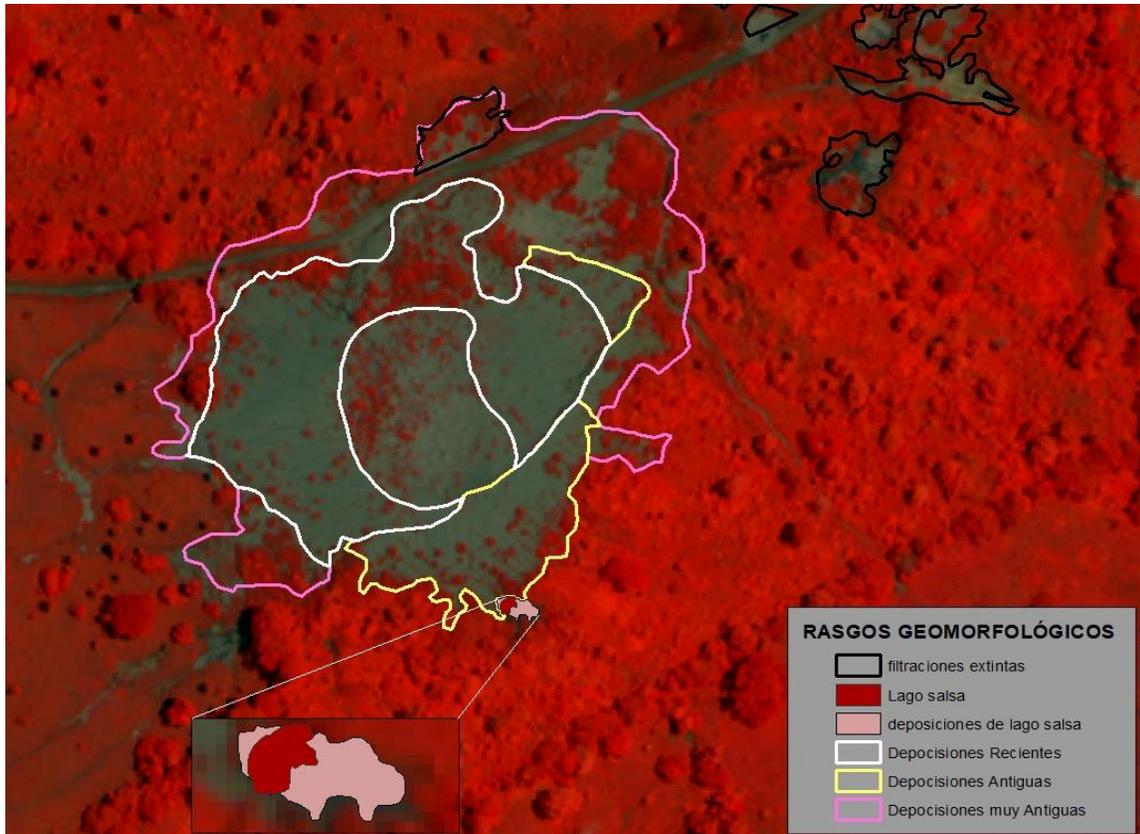
4.2.1.7. Análisis de productos:

Esta fase se dividió en los siguientes pasos:

- a. *Análisis de las imágenes:* se determinaron primeramente las características a analizar. El análisis consistió en dividir la imagen en subunidades, dibujando sobre ella contornos y líneas de manera sistemática de acuerdo con los parámetros a identificar analizando así toda la imagen:
- ✓ Se empleó para la identificación del área afectada por lodo y definición de las unidades, la imagen con la combinación 7-4-1 como se muestra en las figuras 13 y 14:



*Figura 13. Combinación 7-4-3 para San Diego
Fuente Este estudio.*



*Figura 14. Combinación 7-4-3 para El Palmar.
Fuente. Este estudio.*

b. Clasificación de los elementos: se observó y reconoció la disposición, distribución, forma etc., de los objetos en la imagen y se identificaron como un objeto conocido asignándole un nombre o termino (figura 15).

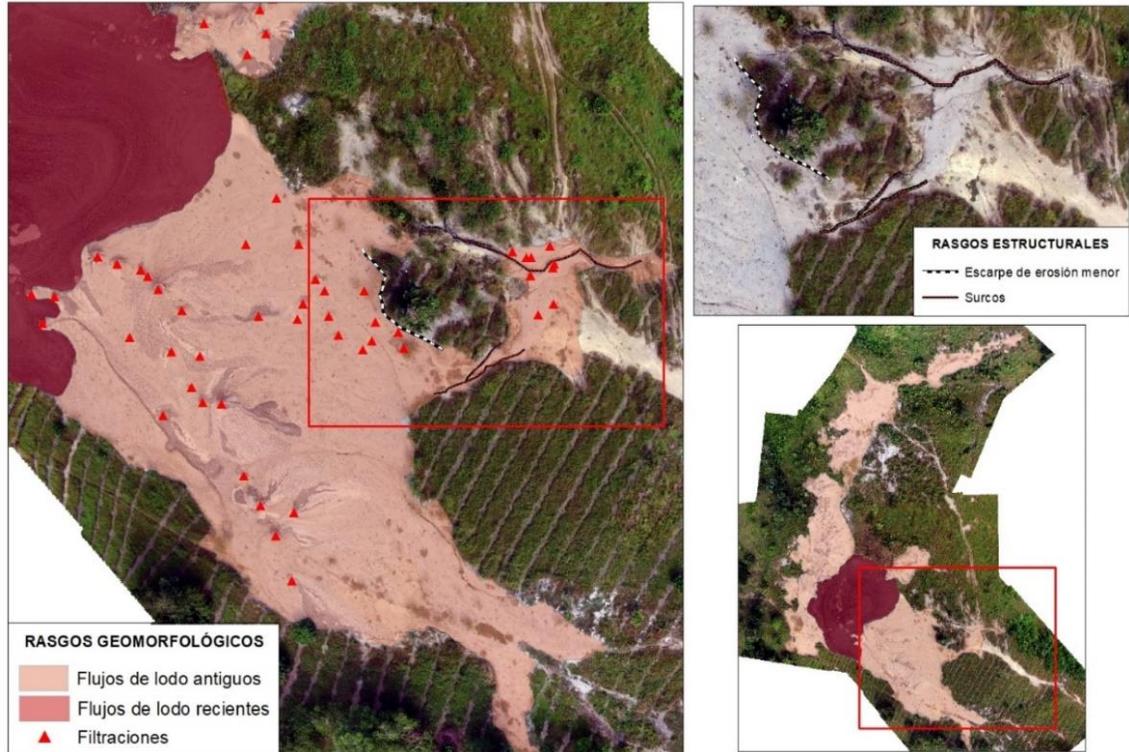


Figura 15 Identificación de rasgos geomorfológicos y estructurales para San Diego (Mosaico).
Fuente. Este estudio.

A cada uno de los componentes identificados en campo e imágenes se les asigna una nomenclatura acorde a los ambientes y unidades correspondientes, la nomenclatura asignada a San Diego se muestra en la tabla 6 y figura 16.

Tabla 6. Categorización de elementos (San Diego)

Unidad	Símbolo	Ambiente	Símbolo	Componente	Símbolo
Volcán de lodo San Diego	vls	Volcánico sedimentario	vls	Depósitos de lodos antiguos	vlsd1
				Depósitos de lodo reciente	vlsdf2
				Grifos	vlscf
				Lagos salsa	vlscfs
				Laderas inclinadas	Sdsl1

				Laderas plana o suavemente inclinadas	Sdsl2
		Estructural Denudacional	Sds	Escarpe de erosión menor	Sdslme
				Lóbulos coluviales y de soliflucción	Sdslco

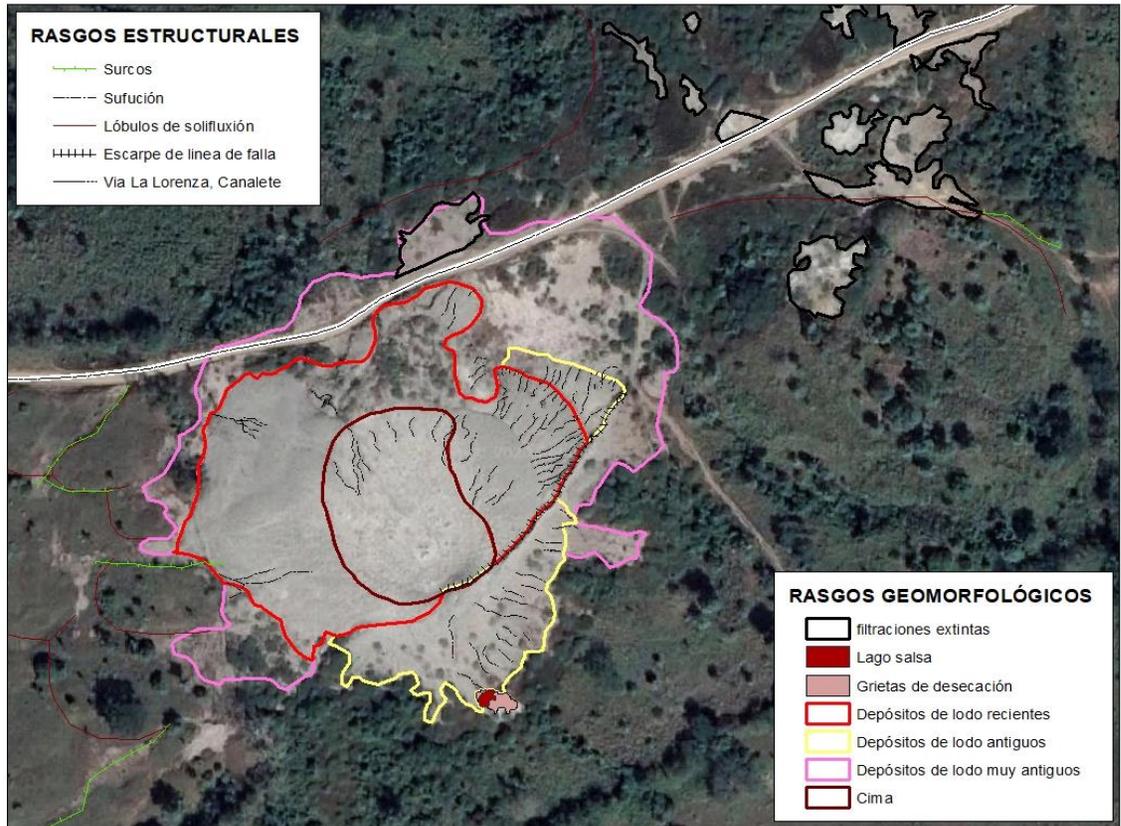


Figura 16 Identificación de rasgos geomorfológicos y estructurales para El Palmar.
Fuente. Este estudio.

La nomenclatura asignada a este volcán se representa en la tabla 7:

Tabla 7. Categorización de elementos (EL Palmar)

Unidad	Símbolo	Ambiente	Símbolo	Componentes	Símbolo
Volcán de lodo El				Depósitos de lodos muy antiguos	vlpd1
				Depósitos de lodo antiguos	vlpd2
				Depósitos de lodo recientes	vlpd3

	vlp	Volcánico sedimentario	(vlp)	Grietas de desecación.	vlpd4
				Cráter en forma de artesa	vlpac
				Lago salsa	vlpcls
				Grifos cementados	vlpge
				Grifo activo	vlpga
				Filtraciones inactivas	vlpffe
	Estructural Denudacional	(Sdp)	Escarpe de línea de falla	Sdplf	
			Lóbulos de soliflucción	Sdplso	

4.2.1.8. Elaboración de la cartografía geomorfológica.

El área de estudio se cartografió en base a los resultados de la poligonización previa a la cartografía preliminar y posterior visita a campo, y se le asignó una gama de colores y códigos a las subunidades siguiendo los estándares establecidos por la Propuesta de estandarización geomorfológica del SGC (Tabla 8).

Tabla 8. Tabla de colores para ambientes morfo genéticos.

GEOFORMAS	COLOR
Volcánico	Rojo
Estructural	Purpura
Denudacional	Marrón

4.2.2. FASE 2: IDENTIFICACIÓN DE AMENAZAS

4.2.2.1. Inventario de eventos volcánicos en Canalete.

Se realizó un inventario de los eventos y efectos ocasionados de forma directa por el sistema volcánico el cual consistió en una revisión de material publicado de tipo académico, periodístico, entre otros, con el fin de establecer cuáles son las amenazas que se han presentado en la zona y que elementos pudieron tener efecto en la magnitud de la amenaza, los cuales

se organizaron espacial y cronológicamente y se establecieron las características eruptivas de los mismos. Se identificaron 6 eventos, los cuales se describieron en la tabla 9:

Tabla 9. Inventario de eventos Volcánicos en canaleta.

FECHA DE EVENTOS	CARACTERÍSTICAS	VOLCÁN
Octubre de 1976	Expulsión de lodos.	SAN DIEGO
Marzo 9 de 1992	Erupción de tipo explosivo.	PALMAR
Diciembre 13 de 2001	Erupción de tipo explosiva.	SAN DIEGO
Agosto 26 de 2008	Expulsión de lodos.	SAN DIEGO
Diciembre 5 de 2017	Erupción no explosiva.	SAN DIEGO
Junio 22 de 2020	Expulsión de lodos.	SAN DIEGO

4.2.2.2. Correlación de unidades geomorfológicas y su amenaza.

Una vez obtenida la cartografía, se identificó las amenazas en cada uno de los volcanes de interés relacionando las geoformas encontradas a un tipo de amenaza (cualitativa) a través una matriz de correlación.

Las amenazas identificadas por volcanismo asociadas a las geoformas volcánicas son las siguientes:

- Expulsión de lodo.
- Expulsión de bloques.
- Expulsión de gases.
- Pérdida de la vegetación.
- Hundimiento del terreno.

Las amenazas asociadas a las geoformas estructurales son las siguientes:

- Pérdida de materiales.
- Desestabilización del edificio volcánico.
- Formación de cárcavas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. CARACTERIZACIÓN DE RASGOS GEOMORFOLÓGICOS Y CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA.

De acuerdo a los lineamientos metodológicos estipulados en la propuesta de estandarización planteada por el SGC, para la zona de estudio se encontró con la siguiente escala a nivel geomorfológico:

5.1.1. GEOMORFOESTRUCTURA

Cinturón del Sinú: es una secuencia de alrededor de 8 km de espesor constituida especialmente por rocas turbidíticas y pelágicas del oligoceno-plioseno (Aristizábal, O. et al. 2009). Esta franja rocosa se extiende desde el golfo de Urabá hasta Barranquilla, en esta zona afloran rocas sedimentarias principalmente de grano fino, las cuales se componen de arcillolitas con pequeños niveles de areniscas de grano muy fino, color gris claro, donde según autores como Duque Caro, estas rocas se encuentran cubriendo un horizonte de sedimentos arcillosos que se encuentran sometidos a altas presiones que serían el origen de los lodos emanados por los volcanes, como se muestra en la figura 17 (INGEOMINAS 2001).

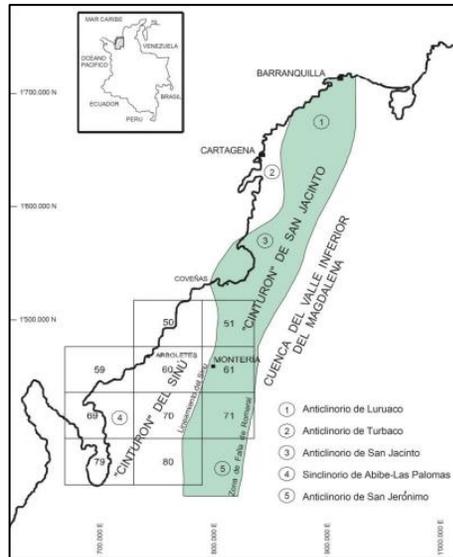


Figura 17. Cinturones plegados del Sinú-San Jacinto
Fuente. INGEOMINAS 1997

5.1.2. PROVINCIA

Sierras homoclinales y espolones estructurales: estas geoformas cuentan con una morfología alomada de alturas entre 200 y 400 m, dispuestas en forma curva en planta, definiendo el límite de las artesas sinclinales amplias de dirección NNE, como los sinclinales de San Juan de Urabá, sinclinal el Carmelo, sinclinal Los Esquimales, el sinclinal el Pantano y el sinclinal de Popayán. Figura 18.



Figura 18. Sierras homoclinales y espolones estructurales.
Fuente. Google Earth

Las sierras homoclinales se caracterizan por estar afectadas por fallamiento y presentar en sus cimas manifestaciones de volcanismo de lodo, a su vez, en estas estructuras se identifican laderas estructurales y de contrapendiente. Estas geoformas están definidas por la disposición estructural de las rocas de las formaciones Floresanto y Pajuil inferior y superior, las cuales presentan pendientes mayores de 45 grados de inclinación y las rocas se encuentran afectadas por el fallamiento flexo deslizante entre estratos en las laderas de contrapendiente, dejando localmente escarpes de línea de falla y facetas triangulares los cuales están asociados al sistema de falla de El Guineo de dirección NE, figura 19, (SGC 2018).

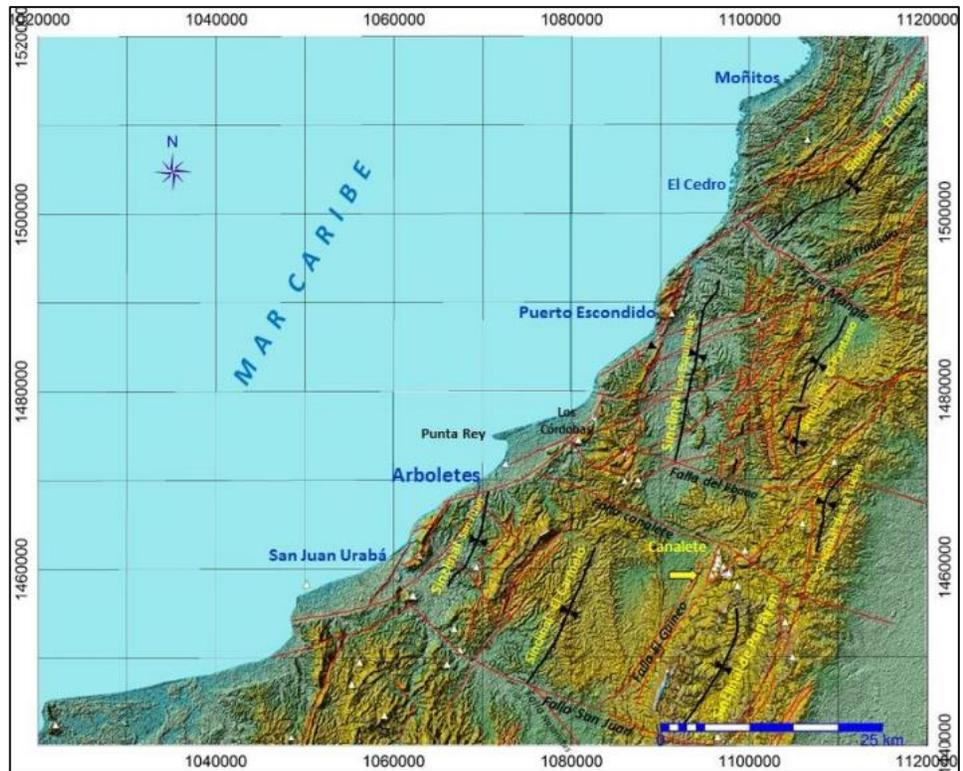


Figura 19. Sierras homoclinales (zonas prominentes) que cuentan con la presencia de volcanes de lodo (triángulos blancos) y en donde se definen las estructuras sinclinales (líneas negras) en cuyo centro se encuentran lomeríos formados por procesos denudacionales acentuados
Fuente. SGC 2018.

5.1.3. REGIÓN.

- I. *Ambiente volcánico sedimentario*: este, mediante procesos endógenos y exógenos dan origen a sub unidades geomorfológicas las cuales están definidas por componentes tales como los depósitos de lodo, grifos, lagos salsa y laderas volcánicas las cuales tienen su origen debido a los procesos de expulsión de gases, lodos y agregados propios de los sistemas volcánicos, de igual manera estas subunidades poseen características similares entre sí, y la unidad que conforman, ya sea la disposición estructural, espacial y geográfica, además del tipo de material y eventos de morfogénesis que poseen cada una.
- II. *Ambiente Estructural denudativo*: de acuerdo al grado de afectación estructural, se tienen desde erosión menor, escarpe de falla y lóbulos de soliflucción.

5.1.4. UNIDAD.

5.1.4.1. VOLCÁN DE LODO SAN DIEGO.

Mediante la visualización y análisis de las pendientes del volcán, se establece que el edificio volcánico San Diego posee pendientes que van entre 0° a 20° , donde los valores más altos se presentan en los flancos del edificio y los valores de pendiente más bajos se encuentra en la cima del mismo.

El área ocupada por lodos en la cima se encuentra en un nivel más elevado en comparación a las características del terreno, producto de la acumulación de lodos por parte de eventos eruptivos anteriores, por lo cual se le establece la categoría de meseta a este sistema volcánico sedimentario (figura 20), en base a la clasificación de Mazzini y Etiope (2017), así mismo las características del volcán San Diego poseen semejanza en cuanto a forma, con diferentes volcanes a nivel global que han sido

catalogados en el mismo grupo como son los volcanes Isis, Amon, y Menes en Azerbaiyán.

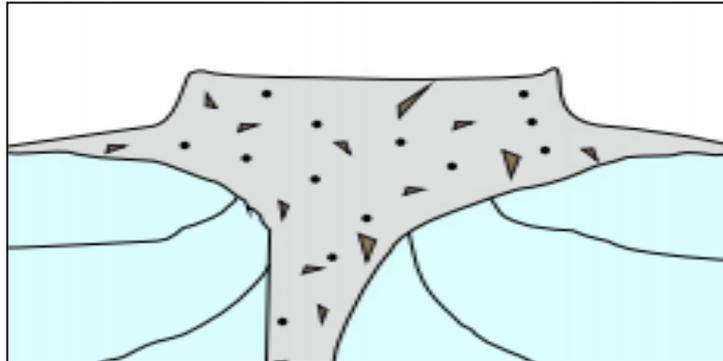


Figura 20. Representación gráfica de la morfología de sistemas volcánicos sedimentarios de tipo meseta, la zona con coloración grisácea hace referencia a la forma de acumulación de los lodos.

Fuente: Mud volcanism: An updated review; Mazzini y Etiope (2017).

En esta unidad, se encuentra una variedad de filtraciones ricas en tamaño y forma en su mayoría dómicas, de las cuales afloran de manera constante lodos (Figura 21). Estas filtraciones se encuentran en alineación predominante SW - NE y SE - NW acorde a los patrones estructurales de la región (SGC 2018).

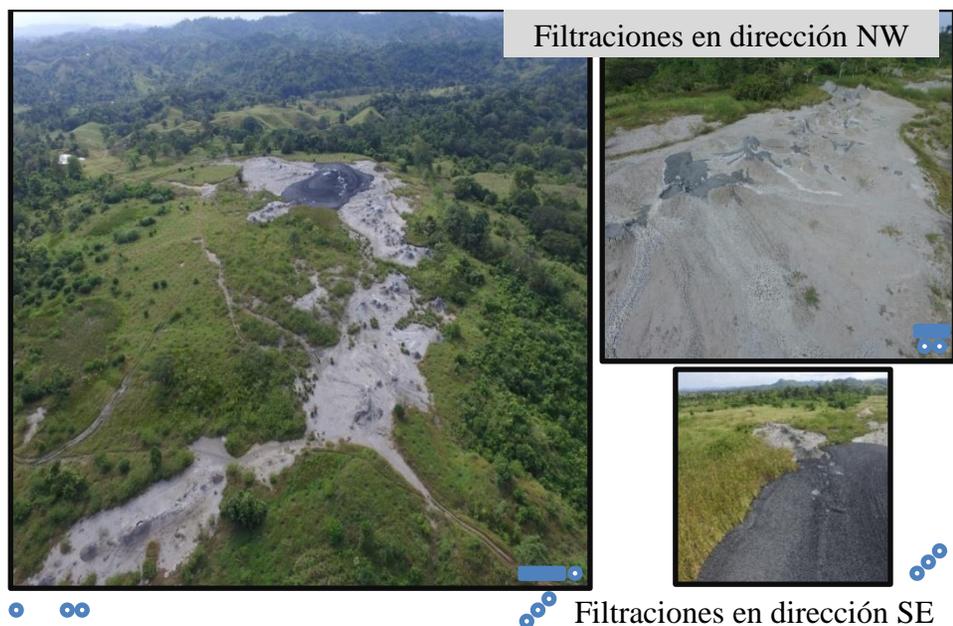


Figura 21. Alineación de filtraciones.

Fuente: CVS 2017.

5.1.4.1.2. CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA DEL VOLCÁN DE LODO SAN DIEGO.

Los ambientes establecidos son de tipo Volcánico Sedimentario (vl) y Estructural Denudacional (Sd), los cuales hacen referencia a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las que se generaron las geoformas y se determinan en base en la interpretación de los procesos geomorfológicos registrados de origen tanto endógeno como exógeno, que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de las mismas (INGEOMINAS 2011).

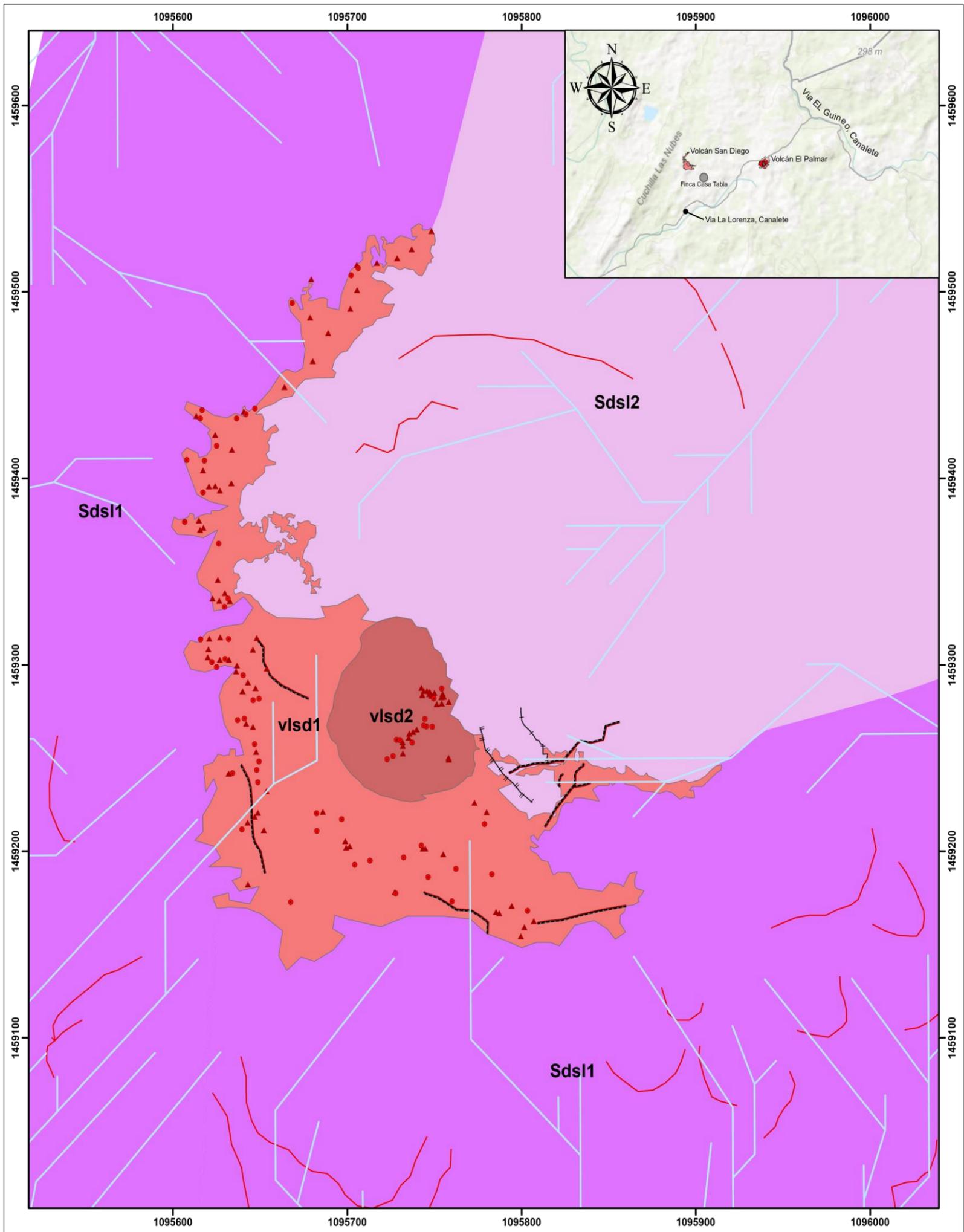
Como se mencionaba, el volcán San Diego, es una geoforma individual, generada por procesos geomórficos constructivos o de acumulación, el cual posee elementos genéticos, morfológicos y geométricos, permitiendo así establecer las subunidades que lo componen, siendo estos los rasgos más relevantes dentro del volcán, compuestos a su vez por componentes propios del volcanismo sedimentario, siendo sintetizados y simbolizados en la tabla 3.

Tabla 10. Tabla de jerarquización geomorfológica volcán de lodo San Diego.

Geomorfoestructura	Provincia	Región	Unidad	Símbolo	Subunidad	Símbolo	Componentes	Símbolo
Cinturón Del Sinú	Sierras homoclinales y espolones estructurales	Volcánico sedimentario (vl)	Volcán de lodo San Diego	vls	Depósitos de lodo	vlsd	Depósitos de lodos antiguos	vlsd1
							Depósitos de lodo reciente	vl sdf2
					Cima plana levemente ondulada	vlsc	Grifos	vlscf
							Lagos salsa	vlsc ls
					Laderas		Laderas inclinadas	Sdsl1
							Laderas plana o suavemente inclinadas	Sdsl2
		Escarpe de erosión menor		Sdsl	Escarpe de erosión menor		Sdslme	
					Lóbulos coluviales y de soliflucción		Sdslco	
		Estructural Denudativo. (Sd)		Sds	Escarpe de erosión menor	Sdsl	Lóbulos coluviales y de soliflucción	Sdslco

En relación a lo anterior los componentes geomorfológicos corresponden a un máximo nivel de detalle en una escala de 1:10000 o menor, los cuales están determinados mediante rasgos de relieve definidos en un área espacial que comparten una morfometría con rasgos similares en el terreno y hacen alusión a las características que componen las subunidades.

Es preciso mencionar que la identificación de estas filtraciones, se logró mediante la visita en campo y una capa de puntos creada por Barros (2021) y Herazo y Torreglosa (2021). Las filtraciones en San Diego, no aparecen de forma aleatoria en este sistema volcánico, sino que son controlados y alineados estructuralmente por el fallamiento de la región, por lo cual se ven agrupaciones siguiendo un patrón determinado (figura 21). En este sentido, para el caso de este estudio, la representación gráfica en el mapa geomorfológico de San Diego se realizó a nivel de componentes como se muestra en la figura 22:



LEYENDA		ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS		VOLCÁN DE LODO SAN DIEGO MAPA GEOMORFOLÓGICO	
Geformas de carácter Volcánico Sedimentario		● Lago salsa	▲ Grifos	FACULTAD DE INGENIERIAS PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL MONTERÍA - CÓRDOBA	
Símbolo	Componentes	— Surcos	— Escarpe de erosión menor		
vlsd1	Depósitos de lodos antiguos	— Reguero	— Lóbulos de soliflucción	DISEÑO: Daniel Pernet Suárez Maira Villegas Sanchez	
vlsd2	Depósitos de lodo reciente	CONVENCIONES — Red Hidrica		ÁREA DE ESTUDIO: Volcán de lodo San Diego Canalete - Córdoba	
Geformas de carácter Estructural Denudativo					
Símbolo	Componentes			Projected Coordinate System: □ MAGNA_Colombia_Oeste	
Sds1	Laderas inclinadas				
Sds2	Laderas plana o suavemente inclinadas				

Figura 22. Mapa geomorfológico del volcán de lodo San Diego.
Fuente: Este estudio.

5.1.4.2. VOLCÁN DE LODO EL PALMAR.

El volcán de lodo El Palmar se encuentra sobre una zona que presenta morfología colinada ondulada con pendientes de 15 grados de inclinación, laderas cortas y convexas. Este volcán posee morfología en forma de domo en cuya parte superior se encuentra un cráter en forma de artesa. Según los registros del SGC, las alturas en el volcán se encuentran en un promedio de 60 a 70 metros y el diámetro del mismo se encuentra entre los 1650 metros.

La forma de este volcán se atribuye a los procesos internos del mismo, donde los materiales lodosos se deforman con mayor facilidad que las rocas que los confinan producto del aumento de la presión y temperatura, produciendo así el levantamiento de los estratos que lo cubren, de tal forma, una vez el lodo que sale a la superficie provoca cambios o deformaciones en el terreno como la morfología cómica para este caso (figura 23).

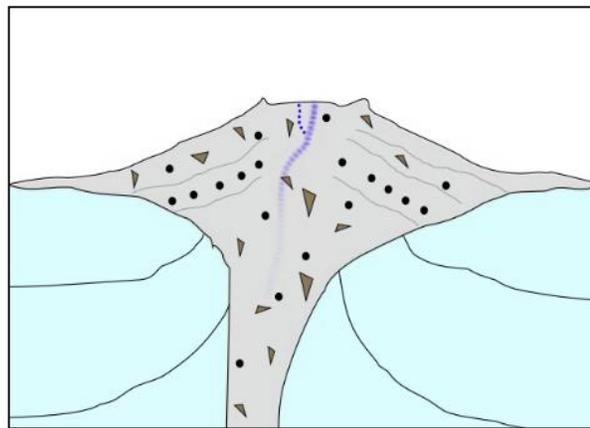


Figura 23 Representación gráfica de la morfología de sistemas volcánicos sedimentarios de tipo cómico, la zona con coloración grisácea hace referencia a la forma de acumulación de los lodos.

Fuente: Mud volcanism: An updated review; Mazzini y Etiope (2017).

Autores como Mazzini y Etiope, concuerdan que esta forma cómica es la de mayor frecuencia en los volcanes tanto de tipo magmático como de lodo, ejemplo de ello se encuentran los volcanes Boyuk Kyanizadag y la mayoría de los volcanes de lodo azerbaiyanos; Dzuhau-Tepe, en la península de

Kerch; Chandragup, en Pakistán. Estas estructuras guardan relación respecto a Palmar debido a que presentan alturas considerables y forma relacionada a la clasificación dómico.

Así mismo, el comportamiento y desplazamiento de los flujos en Palmar se dan a través de todo el edificio volcánico, sin embargo, es mayormente en dirección NE que se presenta la tendencia de los lodos, no obstante, puede notarse depósitos muy bien consolidado lo cual permite la formación de dicho edificio.

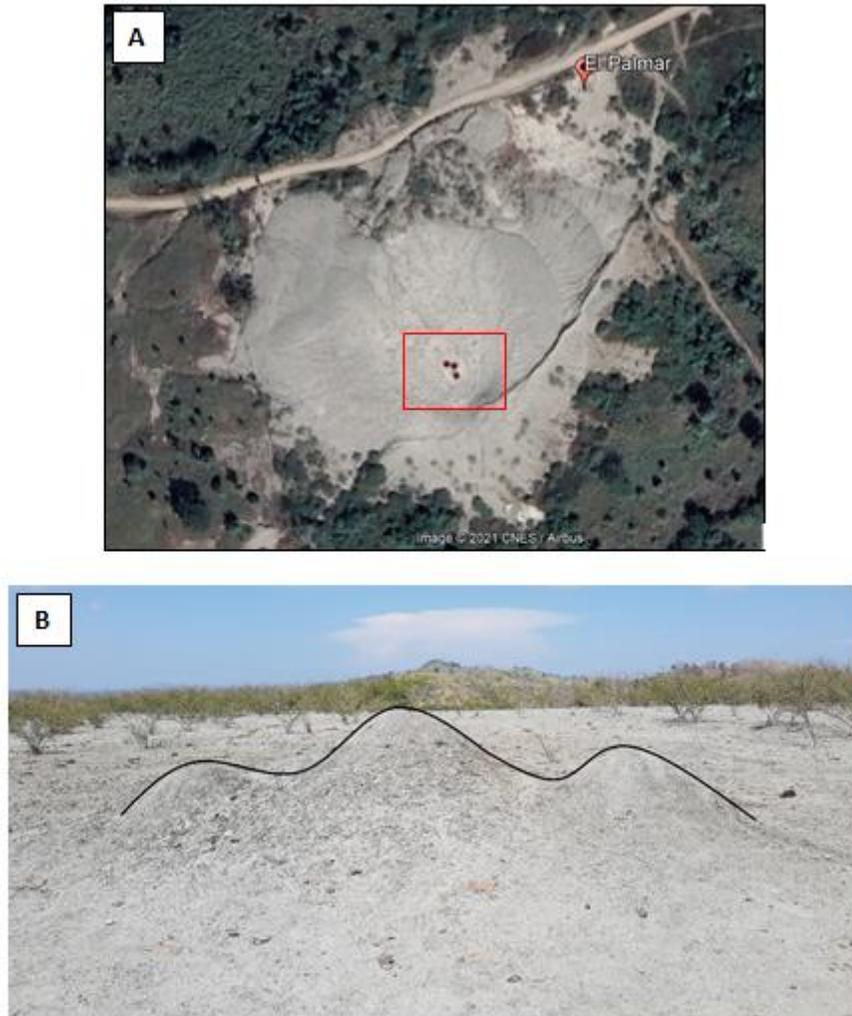
5.1.4.2.1. CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA DEL VOLCÁN DE LODO EL PALMAR.

Las geoformas encontradas para esta unidad, obedecen a los procesos de volcanismo de la región, si bien la provincia geomorfológica donde se encuentra este complejo volcánico ha sufrido procesos de modelado por parte de los procesos denudativos, estos mismos procesos han permitido dividir la provincia en regiones geomorfológicas, definidas éstas por los ambientes morfogenéticos de tipo Volcánico Sedimentario (vl) y Estructural Denudacional (Sd), los cuales a su vez presentan una clasificación de componentes de menor tamaño que son los que conforman de manera articulada el volcán (tabla 11).

Tabla 11. Tabla de jerarquización geomorfológica volcán de lodo El Palmar.

Geomorfoestructura	Provincia	Región	Unidad	Símbolo	Subunidad	Símbolo	Componentes	Símbolo		
Cinturón Del Sinú	Sierras homoclinales y espolones estructurales	Volcánico sedimentario (vl)	Volcán de lodo El Palmar	vlp	Depósitos de lodo	vlpd	Depósitos de lodos muy antiguos	vlpd1		
							Depósitos de lodo antiguos	vlpd2		
							Depósitos de lodo recientes	vlpd3		
							Grietas de desecación.	vlpd4		
					Cima	vlpc	Cráter en forma de artesa	vlpca		
							Lago salsa	vlpcls		
					Grifos	vlpg	Grifos cementados	vlpge		
							Grifo activo	vlpga		
					Laderas volcánicas	vlpl	Laderas inclinadas	vlpl1		
							Laderas muy inclinadas	vlpl2		
							Laderas abruptas	vlpl3		
							Filtraciones inactivas	vlplfe		
					Sdp		Escarpe	Sdpl	Escarpe de línea de falla	Sdplf
							Lóbulos de soliflucción	Sdplso	Lóbulos de soliflucción	Sdplso
					Estructural Denudacional (Sd)					

La identificación de los grifos localizados en El Palmar se realizó mediante la observación de la imagen de Google Earth y la pertinente visita a campo realizada en la cual se corroboró la posición y número de estos grifos. (Figura 24).



*Figura 24. A. Ubicación de los grifos a partir de la imagen Google Earth.
B. Grifos encontrados en campo.
Fuente. Este estudio.*

Para el caso de este estudio, la representación gráfica en el mapa geomorfológico de San Diego se realizó a nivel de componentes como se muestra en la figura 25.

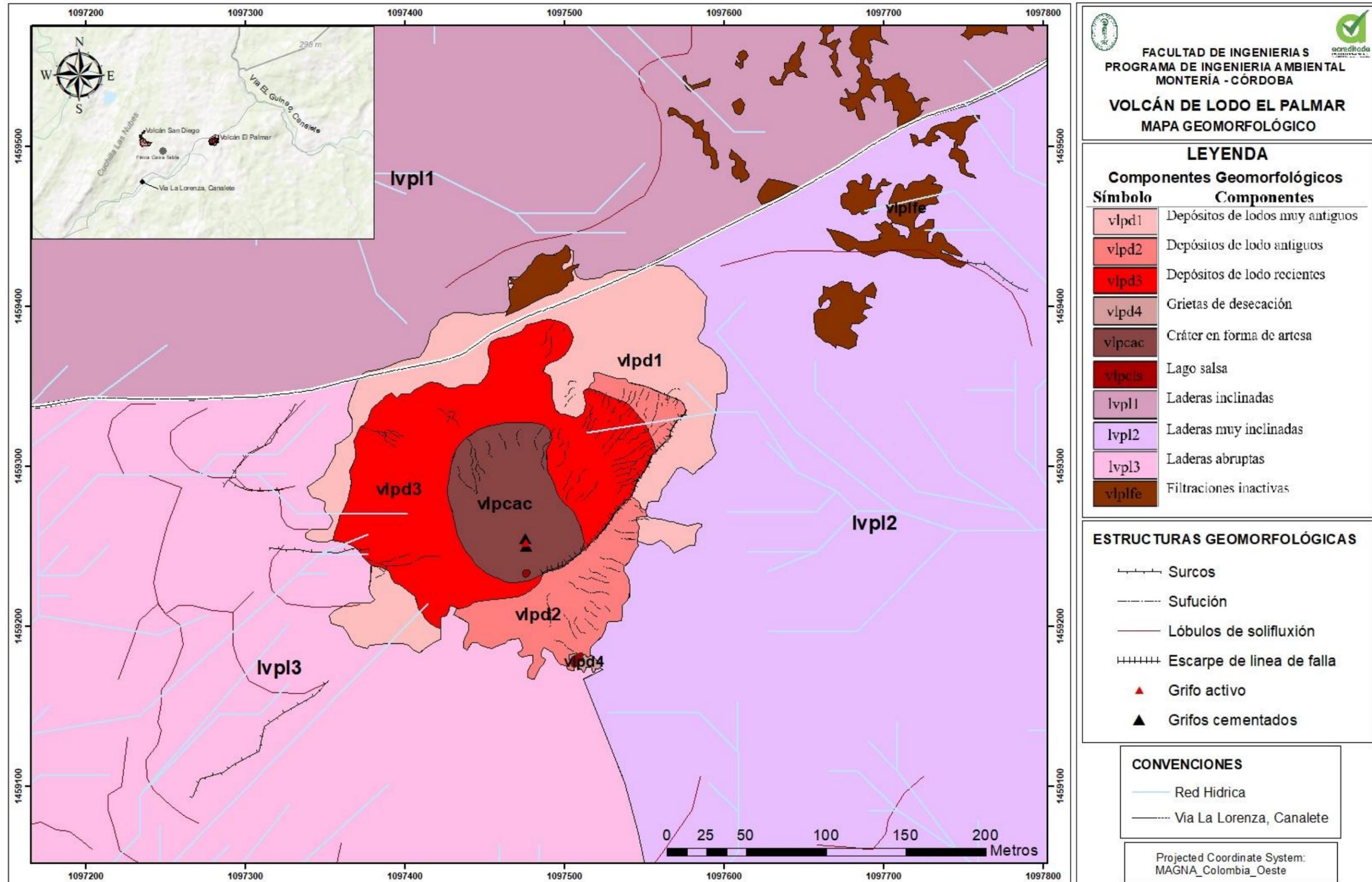


Figura 25. Mapa geomorfológico del volcán de lodo El Palmar.
 Autor: Este estudio.

5.1.5. SUB UNIDADES.

Estas tienen su origen a partir de procesos endógeno y están definidas por los análisis morfológicos y morfogenéticos, a este grupo pertenecen rasgos volcánicos sedimentarios como los depósitos de lodo, grifos, lagos salsa y laderas volcánicas, las cuales tienen su origen debido a los procesos de expulsión de gases, lodos y agregados, propios de los sistemas volcánicos, de igual manera estas subunidades poseen características similares entre sí y la unidad que conforman.

La expulsión y liberación de lodos a la superficie puede darse mediante flujo de lodo (arcilla, agua y gas) o bien sea brecha de lodo (arcilla, roca, agua y gas) los cuales modifican considerablemente el paisaje debido al volumen de sedimentos depositados, donde estos eventos generalmente se repiten en diferentes periodos los cuales poseen diferencia entre sí.

Para el caso de los rasgos estructurales propios de cada unidad, estos están dados por dos razones principales; la actividad volcánica de la zona y el sistema estructural de la región, ejemplo de esto son los lóbulos de soliflucción encontrados en las laderas de los dos volcanes y los escarpes evidenciados de la misma forma en las zonas de estudio.

5.1.6. COMPONENTES.

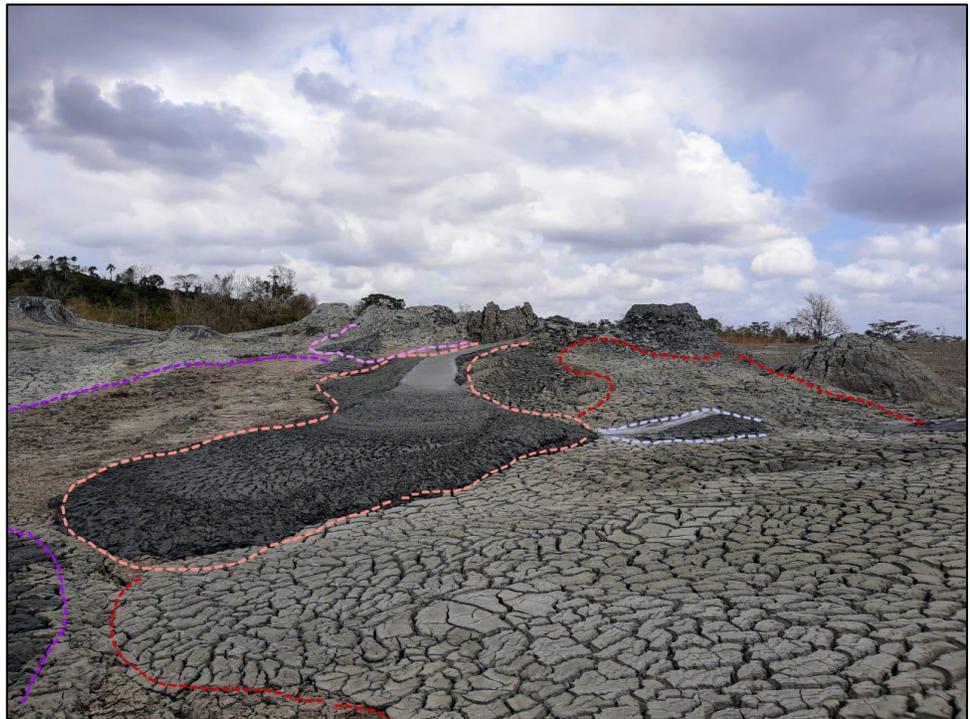
GEOMORFOLOGÍA DE ORIGEN VOLCÁNICO SEDIMENTARIO.

Representan las expresiones superficiales de los procesos subsuperficiales caracterizados por movimientos de grandes masas de sedimentos y fluidos (Lodos) que tienen lugar en el municipio de Canalete en el departamento de Córdoba - Colombia.

Depósitos de lodo recientes (vlpd3/ vlsdf2), antiguas (vlpd2/ vlsd1) y muy antiguas (vlpd1).

Son depósitos que hacen referencia a la entrega y/o aporte de materiales que constituyen el edificio volcánico sedimentario, donde estos depósitos pueden variar desde unos pocos centímetros hasta decenas de metros y son producto de diversas erupciones a lo largo del tiempo, donde es posible realizar una suposición de edad relativa en relación a la posición que poseen los lodos o bien sea los diferentes depósitos existentes, debido a que, generalmente los lodos más antiguos son cubiertos de manera parcial o total por nuevos lodos emergentes del volcán.

La diferencia de color en las áreas, como en la de San Diego (figura 26), indica que los lodos más oscuros son aquellos que han sido depositados hace poco tiempo puesto que su color se debe principalmente al contenido de humedad que estos poseen además de que presentan menor grado de meteorización.



*Figura 26. Depósitos de lodo en San Diego.
Fuente: Este estudio.*

De igual manera los depósitos pueden abarcar una gran área; en el volcán El Palmar, se diferencian tres niveles en los flujos producto de diferentes depósitos de lodos, los cuales poseen coloración y características diferentes, figura 27.



Figura 27. Diferentes depósitos de lodos presentes en el volcán El Palmar.

Fuente: Este estudio.

Grietas de desecación. (vlpd4).

Depósitos de lodos asociados a la actividad de lagos salsa, los cuales se encuentran alrededor de los mismos, como resultado de la diferencia de viscosidad que se presentan entre las filtraciones existentes en el palmar, esta geoforma posee una apariencia similar a un panal debido a la pérdida de humedad de los materiales emergentes (figura 28).



Figura 28. Grietas de desecación producto del lago salsa presente en volcán el Palmar el cual presenta una coloración y granulometría distinta al edificio volcánico en general.

Fuente. Este estudio.

Grifos (vlpj).

Son geoformas de tipo de forma cónica con elevación variable, formadas por la emisión constante de lodos las cuales pueden agrupar en varias unidades o como formas individuales que poseen una altura de pocos centímetros hasta los 3 - 4 m, la mayor presencia de estos se evidenció en el sistema volcánico de San Diego donde se encuentran de forma activa, figura 29.



Figura 29. Grifos presentes en los sistemas volcánicos estudiados, encontrándose en mayor número en el volcán San Diego (B) y solo 3 de estos en el volcán El Palmar (A).

Fuente. Este estudio.

Grifos cementados (vlpge).

Los cuerpos de estos grifos están formados por capas de lodos superpuestas resultado de erupciones de lodos de manera continua o semicontinua, cuando se presentan épocas de sequía aumenta la radiación solar elevando las temperaturas en la superficie de los grifos perdiendo la humedad, lo que provoca que las arcillas se endurezcan y como resultado se forme una obstrucción en los grifos evitando la filtración de lodos, figura 30. (Mazzini y Etiope 2018).



*Figura 30. Grifos sin cráter producto del secado de los lodos, provocando un taponamiento de los mismos y evitando la filtración de lodos en El Palmar.
Fuente. Este estudio.*

Lago salsa (vlscls/ vlpcls).

Son estructuras de forma sub-circular donde se produce la filtración de gas y agua y una pequeña cantidad de lodo filtrada. Estos sitios pueden alcanzar decenas de metros de diámetro y varios metros de profundidad. (Mazzini y Etiope 2017).

Se encontraron para el caso de Palmar, solo dos de estas geoformas, los cuales presentan características dimensionales, de forma y materiales emitidos muy diferentes, San Diego, lagos salsas de diámetros variables, de entre 10 centímetros hasta los 9,8 metros (Barros 2012) (figura 31).

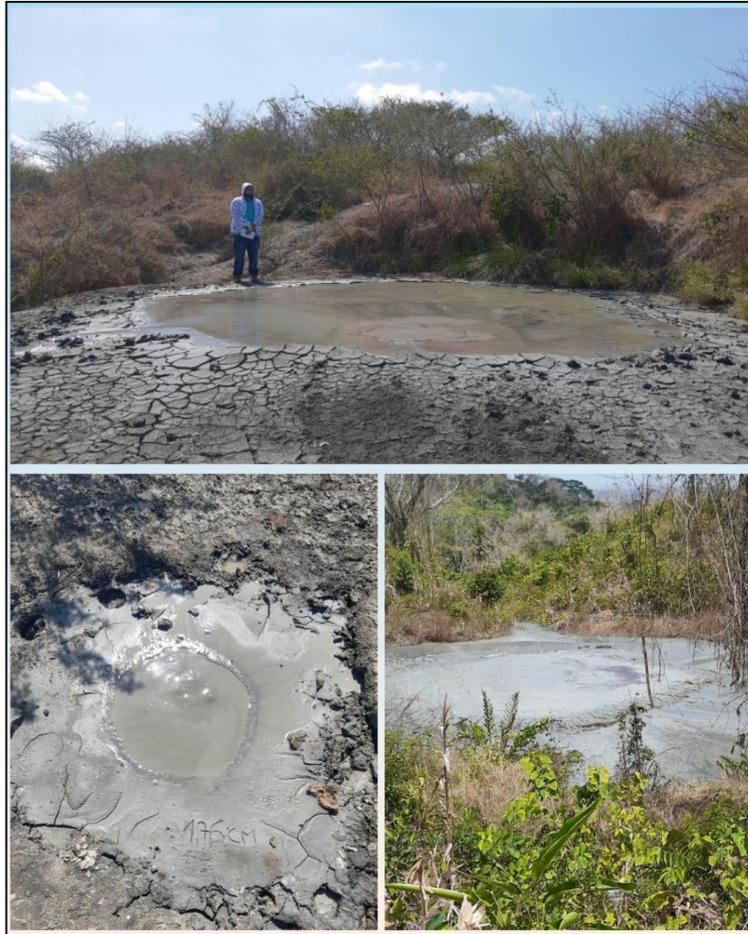


Figura 31. Diferentes lagos salsa presentes en el sistema volcánico sedimentarios.

Fuente: Este estudio.

Cráter en forma de artesa (vlpcac).

Esta zona es de forma cóncava, se encuentra en la zona más alta del edificio volcánico de El Palmar, su formación está asociada a la presencia de un ambiente volcánico sedimentario y procesos explosivos causados por la expulsión de lodos, figura 31. (SGC 2017).

En el perfil topográfico A-A' (figura 16-B) se corrobora la forma cóncava del volcán, la forma de la cima y la tendencia de los lodos en dirección NW influenciados por la inclinación de esta ladera (figura 32).



Figura 32. A) Cráter en forma de artesa del volcán El Palmar. B) perfil longitudinal. Fuente: Google Earth pro (CANALETE, Canalete, Córdoba).

Fuente: Este estudio.

Laderas volcánicas sedimentarias (vlp).

Esta forma del terreno está constituida por una superficie inclinada que corresponde a la parte intermedia o flanco de la loma. Presenta perfil topográfico de convexa a recta, forma compleja, longitud corta y pendiente inclinada a muy inclinada (figura 33). Las diferentes configuraciones de la ladera favorecen la remoción y el arrastre de material por escorrentía superficial no concentrada, el cuál es el caso de las laderas en Palmar, en donde dicho material se deposita en la base, son denominadas como laderas volcánicas sedimentarias debido a que su formación radica en el aporte de lodos producidos por el sistema volcánico sedimentario. (J-Gallindo-Zaldívar & L.M Nieto (1994).)

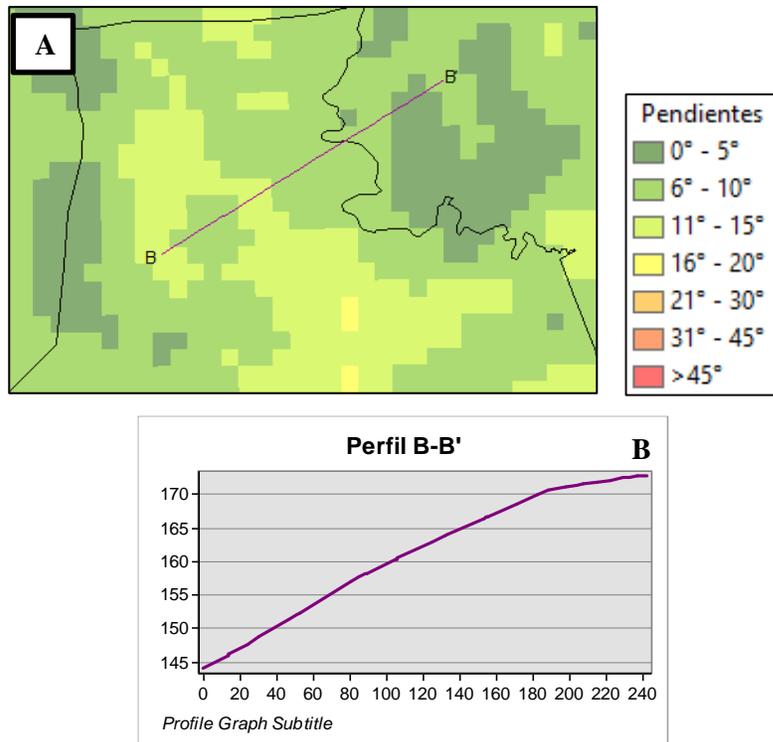


Figura 33. Sección de ladera del volcán El Palmar. B) Perfil longitudinal de la geoforma.
Fuente: Este estudio.

Filtraciones inactivas (vlplfe).

La fotointerpretación de imágenes satelitales en diferentes periodos de tiempo, permitió establecer que existieron zonas y/o filtraciones que generaban aporte de material al sistema volcánico los cuales dejaron de emitir por razones asociadas a las características internas del volcán sedimentario principalmente.

En la figura 34, se observa menor presencia de vegetación y zonas con coloraciones más claras asociadas a filtraciones activas, de igual forma se presenta un marmoleado de tonos café producto del movimiento de los lodos, a la derecha se presenta la misma zona 6 años después donde se presenta una colonización por parte de la vegetación y vestigios de las zonas por la cual eran expulsados los materiales, se aprecia áreas de color grisáceas donde se presentaban las filtraciones.



*Figura 34. Zona de filtraciones inactivas en El Palmar.
Fuente: Este estudio.*

5.1.7. GEOMORFOLOGÍA DE ORIGEN ESTRUCTURAL-DENUDACIONAL.

En la zona de estudio se representan geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que modelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y, de igual manera crean nuevas por la acumulación de sedimentos provenientes de la meteorización física de lodos, junto con los procesos relacionados con la dinámica interna de la tierra, asociados principalmente al plegamiento y el fallamiento de los materiales, donde estas formaciones facilitan y aumentan la acción combinada de los procesos de meteorización y erosión, de igual manera el fallamiento puede generar fracturas en los materiales superando la elasticidad de los elementos que la conforman y consecuentemente aumenta el nivel de exposición de los mismos formando

geoformas de origen estructural denudacional. (IDEAM 2015); (SGC 2015); (IGAC 2018).

Escarpe de línea de falla (Sdplf).

Es una forma de relieve fundamental que aparece como consecuencia de los movimientos tectónicos. Es la desnivelación topográfica entre dos bloques fallados que tiene una parte estructural y otra erosiva en la desnivelación topográfica.

Según sea el papel desempeñado por la tectónica y por la erosión diferencial de la formación del escarpe. En el volcán El Palmar de evidencia esta forma de terreno desde la cima del volcán hasta la parte inferior del mismo, figura 35.



*Figura 35. Escarpe de línea falla en el volcán El Palmar, con una altura máxima de 1,46 m.
Fuente: Este estudio.*

La presencia del escarpe de línea de falla permite inferir que existe una erosión diferencial entre bloques fallados continuos que ofrecen diferente resistencia donde el bloque un material mucho más resistente queda saliente o marcado en el terreno INGEOMINAS (2011). Al generarse este fenómeno se genera un desnivel entre los dos bloques los cuales eventualmente desaparece, en este caso se puede deber a que los materiales expulsados por el volcán cubrieran la falla de manera parcial donde posteriormente por efecto de la erosión comenzó de nuevo el proceso de aparición de esta.

Escarpe de erosión menor (Sdslme)

Ladera o desplome de longitud larga o corta, con forma cóncava o convexa y eventualmente recta, es generada por la socavación fluvial lateral o por procesos de erosión y movimientos en masa remontantes a lo largo de un drenaje mayor, presenta susceptibilidad a movimientos en masa, pero en una magnitud muy mínima. Este se encuentra en el volcán San Diego en la parte inferior de su ladera sur, figura 36. (SGC 2015).



*Figura 36. Escarpe de erosión menor presente en el Volcán San Diego.
Fuente: Informe de visita técnica características de la actividad eruptiva reciente del volcán de lodo de San Diego - la Lorenza, municipio de Canalete – Córdoba (2018).*

Lóbulos de solifluxión (sdslco/ sdplso)

Geoforma de cono o lóbulos de longitudes cortas a largas, de forma convexa e inclinación suave a abruptas, se originan respectivamente por acumulación de materiales sobre las laderas tanto por procesos de escorrentía superficial como flujos lentos y viscosos de suelos saturados y no saturados, se constituye de bloques angulares a subangulares de diferentes tamaños embebidos en material arcilloso, figura 37. (IGAC 2016); (SGC 2015).



Figura 37. Fotografía satelital de Google Earth donde se aprecian acumulación de materiales formando estructuras con fisiografía distintiva resaltada en color rojo.

Fuente. Este estudio.

5.1.8. PROCESOS EROSIVOS.

Sufusión

El proceso de sufusión o pinping tiene un impacto muy marcado en el edificio volcánico de El Palmar, este proceso se presenta debido a la erosión mecánica por dispersión, disolución y exportación que acaece los lodos que se presentan en el área, cuyos minerales son evacuados por flujos hídricos subsuperficiales, especialmente cuando los materiales constituyentes son mayoritariamente finos (limo y arcilla) como es el caso de Palmar, con

un alto contenido en sodio y arcillas expandibles. Los elementos granulométricos de menores dimensiones son evacuados dando lugar a un ensanche de las grietas previas, más o menos verticales.

Al colapsar suelen dan lugar a cárcavas superficiales, y paisajes de badlands cambiando el modelado previo de la superficie del terreno suprayacente, figura 38.

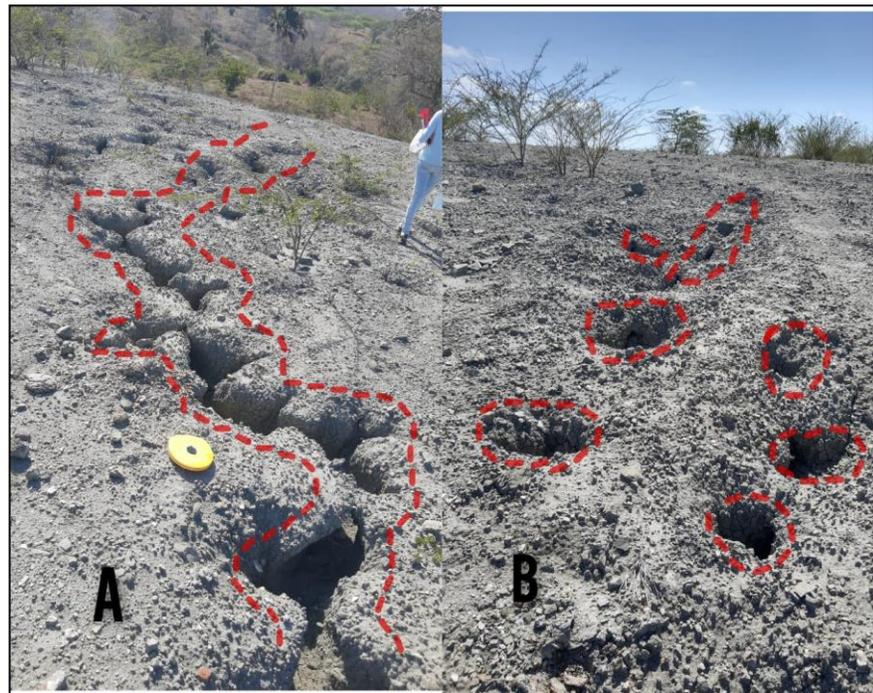


Figura 38. Erosión por sufusión presente en el volcán El Palmar, a medida que se alejan de la zona más alta podemos encontrar canales formados debido a la interconexión de las diferentes áreas colapsadas, en (A) canales interconectados y (B) pinping aislados.

Fuente: Este estudio.

La presencia de estos eventos erosivos predomina en la zona NE del volcán y se presenta en los diferentes depósitos, donde a medida que se acerque a la cima, los procesos erosivos son menores puesto se presentan como tubos no interconectados, pero a medida que nos desplazamos a las partes más bajas del edificio volcánico se presentan canales interconectados, donde

esto se debe a que al momento de las lluvias estas escurren desde la zona más alta del volcán.

Surcos

Son aquellos procesos de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción del agua, donde por su escurrimiento superficial y subsuperficial llegan a desintegrar el suelo, los cuales pueden llegar a tener una profundidad de varios centímetros hasta algunos metros, donde eventualmente si no se usan métodos para conservar el suelo pueden llegar a convertirse en cárcavas. Son de común ocurrencia en el sector volcánico de San Diego (figura 39) (IGAC 2018).



Figura 39. Surcos presentes en el sistema volcánico sedimentario San Diego.

Fuente: Este estudio.

Regueros

Este tipo de proceso erosivo se considera un punto intermedio entre surcos y cárcavas, el cual se formó en el volcán San Diego como resultado de la escorrentía superficial concentrada o bien sea el colapso y/o remoción del material en relación al peso del mismo cuando es saturado con grandes cantidades de agua, como se observa en la figura 40, además de la susceptibilidad del material al ser removido en relación a las características físicas del mismo y la pendiente de esta área en particular.



*Figura 40. Regueros (rills) presente en el volcán San Diego, la cual posee un valor máximo de extensión de 2,47 m y una longitud mayor de 8 metros.
Fuente: Este estudio.*

5.2. CORRELACIÓN DE AMENAZAS

La amenaza es definida como la ocurrencia de un evento o fenómeno natural o antrópico, que pueda causar daño en un lugar y tiempo específico. Debido a la complejidad de los sistemas físicos donde las variables involucradas en la identificación de la amenaza condicionan el proceso, provocan que no se cuente con técnicas que permitan la modelación con precisión de tales sistemas, por este motivo, la amenaza en la mayoría de los casos es determinada combinando análisis físicos de la fuente generadora y la información de los eventos ocurridos en el pasado, tratando de modelar así, con algún grado de aproximación los sistemas físicos involucrados (Cardona O).

Los eventos volcánicos en Canalete por su parte, tienen un registro de 6 erupciones ocurridas en los últimos 45 años, de los cuales 2 de estos han sido objeto de estudio a mayor detalle, estos son los eventos ocurridos en marzo de 1992 (INGEOMINAS 1992) y diciembre de 2017 (SGC 2018), a continuación, en la tabla 12, se muestra la fecha de eventos y las características definidas de cada uno.

Tabla 12. Inventario de eventos eruptivos.

FECHA DE EVENTOS	CARACTERÍSTICAS	VOLCÁN	FUENTE
Octubre de 1976	Expulsión de lodos, no existe registros asociados a este evento ni a las características de la erupción. Erupción de tipo explosivo, arrojando material semiconsolidado al aire a unos 20-25 m de altura,	SAN DIEGO	SGC (2002)

Marzo 9 de 1992	los cuales al caer se acumularon en los alrededores de la boca principal, conformando un cumulo de aproximadamente 80 metros de diámetro mayor y un espesor variable de 1-4 metros junto con la emisión de gas (metano) el cual hizo combustión y ocasiono la quema de pastos y árboles en un área de 300m	PALMAR	INGEOMINAS (1992)
-----------------	--	--------	-------------------

Diciembre 13 de 2001	Erupción de tipo explosiva la cual ocasiono daños a la carretera en la zona norte del volcán, en un tramo de 200 m debido a la deformación del terreno que ocasiono grietas radiales desde el centro del cráter, donde estas grietas se presentaron en terrenos relativamente blandos de arcillolitas.	SAN DIEGO	SGC (2002)
----------------------	--	-----------	------------

Agosto 26 de 2008	Expulsión de lodos, no existe registros de las características de la erupción.	SAN DIEGO	SGC (2008)
-------------------	--	-----------	------------

	Erupción no explosiva, donde fueron expulsados $3000m^3$ de lodo, donde el material involucrado y extraído de este evento según SGC corresponde a arcillas grises claras de		
--	---	--	--

Diciembre 5 de 2017	baja densidad, que alcanzaron los 4 metros de espesor. Es común encontrar embebidos, fragmentos de 10 a 20 brechas o clastos, areniscas finamente laminadas y fragmentos de calcita	SAN DIEGO	SGC (2007)
Junio 22 de 2020	Expulsión de lodos, no se tiene registro de las características eruptivas.	SAN DIEGO	El Tiempo.

La erupción de los volcanes de lodos están asociados a una o varias de las siguientes manifestaciones: Expulsión violenta de lodos y generación de flujos, expulsión violenta de bloques, fracturamiento del terreno circundante, emisión de gases, generación de incendios y las ondas de choques., puede incluirse, además, la sismicidad local generada durante el evento que localmente puede generar deslizamientos, e indirectamente el impacto o shock nervioso producido a las personas que viven en zonas próximas a estos eventos.

Los eventos de mayor complejidad por el nivel en la expulsión de materiales y afectaciones en la zona, son para San Diego, las registrada el 13 de diciembre de 2001, 26 de agosto de 2008 y el 5 de diciembre de 2017 en donde no se registraron incendios, sin embargo, la actividad fue de forma violenta debido a los gases predominantes en metano y CO₂ y fueron extruidos 3000 m³ de lodo que se extendió a lo largo de 68 m en dirección NNE (SGC 2018).

Para el caso de Palmar, se registra la presentada el lunes 9 de marzo de 1992 cerca de las 2:37 pm, las características de esta erupción fueron de tipo explosivo, el material extruido correspondía a arcillas grises

encontrándose gránulos de 3-10 mm, a esta erupción también se le suma la emisión de gases, los cuales al hacer combustión generando incendios ocasionando la quema de pastos alrededor de la zona afectada. De este evento se registraron pérdidas animales y quemaduras leves en algunos habitantes del sector (INGEOMINAS 1992). Así mismo los habitantes del área reportaron que eventualmente se escucharon explosiones provenientes del volcán.

Si bien es cierto que en San Diego también se encontraron evidencia de brechas de lodo, la diferencia de tamaño que se presenta entre este y Palmar es muy significativa, además la fuerza necesaria para expulsar los bloques presentes en el Palmar debe de ser mucho mayor a la de San Diego, en este orden de ideas, las brechas de lodos expulsadas (Figura 41 y 42) pueden actuar como un proyectil el cual puede viajar decenas de metros sea de forma vertical y horizontal trayendo consigo posibles daños a la integridad física de las personas, animales e infraestructura.



Figura 41. Bloques diseminados en la superficie presente en el sistema volcánico de San Diego (abajo) y El Palmar (arriba).

Fuente: Este estudio.



*Figura 42. Clastos encontrados en el sistema volcánico El Palmar, distribuidos por todo el edificio volcánico.
Fuente. Este estudio.*

Las amenazas en los sistemas volcánicos San Diego y Palmar se asocian en diferentes aspectos como son las unidades geomorfológicas y las características asociadas a los eventos eruptivos como explosiones acompañadas por expulsión de gases, incendios, deslizamiento y/o movimientos en masa, expulsión de bloques y fallamiento y fracturamiento del terreno.

En relación a lo anterior al momento de una erupción son liberados grandes volúmenes de lodo y gas los cuales son en su mayoría metano (CH_4) con concentraciones moderadas gas hidrocarburo más pesado ($\text{C}_2 +$), nitrógeno (N) y dióxido de carbono (CO_2) (Etiopie 2009), donde estos elementos son liberados con una gran cantidad de energía, puesto que provienen de la profundidad del suelo los cuales ejercen una gran cantidad de presión.

Si analizamos las características de los eventos que han ocurrido con las características geomorfológicas de cada uno de los volcanes podemos inferir que existe una relación entre las filtraciones que se presentan en el

San Diego y el Palmar junto con los eventos ocurridos en cada uno, es decir, en el San Diego se han presentado 5 eventos de los cuales 1 fue de tipo explosivo cuyo efecto más significativo fue la deformación del terreno en depósitos con características estructurales débiles, por otro lado tenemos al Palmar en el cual se ha registrado 1 solo evento donde presentó la expulsión de material consolidado y combustión de gas metano los cuales ocasionaron la quema de un área aproximada de 300 m, en este orden de ideas, las filtraciones presentes en El Palmar se encuentran en la cima del mismo, las cuales varias de estas están cementadas producto del secado de los lodos en la superficie de cada una, en comparación a San Diego el cual tiene una gran cantidad de filtraciones distribuidas por todo el sistema volcánico donde estos están en constante actividad durante todo el año.

Esto quiere decir que a pesar de que en San Diego se han presentado más eventos eruptivos las características de estos no han tenido una magnitud similar a la ocurrida en el Palmar esto debido a que en este, ocurren potentes explosiones freáticas de gas con liberación de grandes volúmenes de material arcilloso en poco tiempo asociadas a la combustión espontánea de gas por acumulación y sobrepresión lo cual aumenta la magnitud de las explosiones al momento de eventos eruptivos y el aumento de combustión de gases como se observa en la figura 43.



Figura 43. Quemadas asociadas con incendios generados durante la erupción del volcán de lodo de san diego - la Lorenza del 9 de marzo de 1992.

Fuente: Informe de visita técnica características de la actividad eruptiva reciente del volcán de lodo de San Diego - La Lorenza, municipio de Canalete – Córdoba

Como se mencionó anteriormente, los eventos violentos de expulsión de lodos generalmente son acompañados por explosiones que dan lugar a inestabilidad en el terreno, donde este comportamiento puede estar relacionado a eventos de movimiento tectónico como son los sismos o terremotos, distintos autores como, R.J.Davies et.al (2006); A. Mazzini et.al (2007); R.Mellors (2007); M.Bonini (2009); M. Manga (2010); D. Maestrelli et.al. (2017) han estudiado a nivel internacional esta relación.

Para los volcanes San Diego y El Palmar se ha tenido en cuenta la historia sísmica del departamento de Córdoba (figura 44) y se ha comparado con los diferentes eventos registrados (tabla 12) y ningunos de los eventos eruptivos y sísmicos se relacionan de manera directa ya que los sismos ocurrieron en municipios diferentes a Canalete y en periodos de tiempo diferentes, donde estos sismos se presentaron con poca intensidad, aunque no se descarta la posibilidad que se genere un sismo y/o terremoto que detone la erupción de alguno de los sistemas volcánicos.

Historia sísmica del Departamento de CORDOBA

No.	Fecha	Hora local	Latitud epicentro	Longitud epicentro	Magnitud	Tipo magnitud	Profundidad (km)	Centro poblado	Intensidad sitio (EMS-98)	Intensidad máxima (EMS-98)
1	1967/02/09	10:24	2.85	-74.8	7	MW	55	Cereté, Córdoba	2	10
2	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	Cereté, Córdoba	3	7/8
3	1942/12/26	07:30	9.19	-75.84	6.2	MW	15	Chima, Córdoba	7	8
4	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	Chinú, Córdoba	3	7/8
5	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	Ciénaga de Oro, Córdoba	3	7/8
6	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	Cotorra, Córdoba	4	7/8
7	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	Momil, Córdoba	3	7/8
8	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	Montería, Córdoba	3	7/8
9	1977/08/30	19:42	7.35	-76.14	6.5	MW	23.3	Montería, Córdoba	5	7
10	1967/07/29	05:24	6.747	-73.03	6.8	MW	161	Montería, Córdoba	5	8
11	2015/03/10	15:55	6.825	-73.134	6.3	MW	157.7	Montería, Córdoba	4	7
12	1973/08/30	13:25	7.14	-72.76	6.3	MW	180	Montería, Córdoba	4	8
13	1911/04/10	13:42	6.96	-75.41	6.4	MW	120	Montería, Córdoba	4	7
14	1967/02/09	10:24	2.85	-74.8	7	MW	55	Montería, Córdoba	3	10
15	1962/07/30	15:18	5.17	-76.35	6.5	MW	64	Montería, Córdoba	4	8
16	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	Purísima, Córdoba	3	7/8
17	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	San Antero, Córdoba	3	7/8
18	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	San Carlos, Córdoba	4	7/8
19	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	San Pelayo, Córdoba	3	7/8
20	1869/03/06	06:30	9	-74	6	MS	60	Santa Cruz de Lórica, Córdoba	3	7/8
21	1942/12/26	07:30	9.19	-75.84	6.2	MW	15	Santa Cruz de Lórica, Córdoba	8	8
22	1992/10/18	11:12	7.07	-76.8	7.1	MW	10	Tierralta, Córdoba	5	10

Historia sísmica del Departamento de CORDOBA

Figura 44. Sísmicidad histórica del departamento de Córdoba- Colombia

Fuente. SGC 2021

Podemos agregar que las características físicas del entorno en los volcanes San Diego y Palmar son muy importantes ya que de manera directa o indirecta estas, tienen un impacto en la magnitud de un evento eruptivo o bien sea en las características geomorfológicas de cada volcán, una de las más importantes es la vegetación.

Si bien es cierto que debido a los constantes depósitos de lodos a los que se tienen lugar se pensaría que no existe vegetación, sin embargo, se hacen presente ciertas especies de plantas como pastos, forrajes y algunas especies arbustivas (figura 45) las cuales tienen un papel muy significativo ya que estas ayudan a disminuir y controlar los procesos erosivos, donde se deben tener en cuenta 3 factores que son la altura de la altura de las especies es muy reducida, en comparación con los bosques tropicales cuya flora tiene una altura promedio de 5 metros, lo cual es un elemento a favor ya que cuando las copas de los árboles son muy altas estas intercepta la lluvia, aumentando la energía cinética de las gotas de agua y provocando tasas de erosión mayor que en áreas sin vegetación con precipitación directa FAO(2015); García, V.A. (2017).

En cuanto a la continuidad de la vegetación está de manera dispersa, donde en el volcán San Diego, se encuentra en su mayoría alrededor de este, siendo predominante los pastos y forrajes, caso contrario ocurre en el Palmar, la vegetación es en su mayoría de tipo arbustivo y se encuentra dentro de todo el edificio volcánico, donde la presencia de vegetación en áreas específicas se puede deber principalmente a la actividad de cada volcán.

En San Diego, los eventos son más constantes creando una nueva capa de lodos que cubre a la anterior disminuyendo la aparición de la vegetación, en cambio en El Palmar, se encuentran en todo el sistema debido a los pocos eventos eruptivos que han tenido lugar, permitiendo así el crecimiento de vegetación, la cual, sin importar el caso, disminuye la velocidad del agua, reduciendo la erosión y atrapando los sedimentos

además los componentes radiculares de las plantas aumentan la resistencia mecánica de los depósitos de lodo FAO(2000); García, V.A. (2017). Lo cual tiene un efecto en la estabilidad de los depósitos de lodo disminuyendo en cierto grado los procesos de remoción y transporte de materiales.

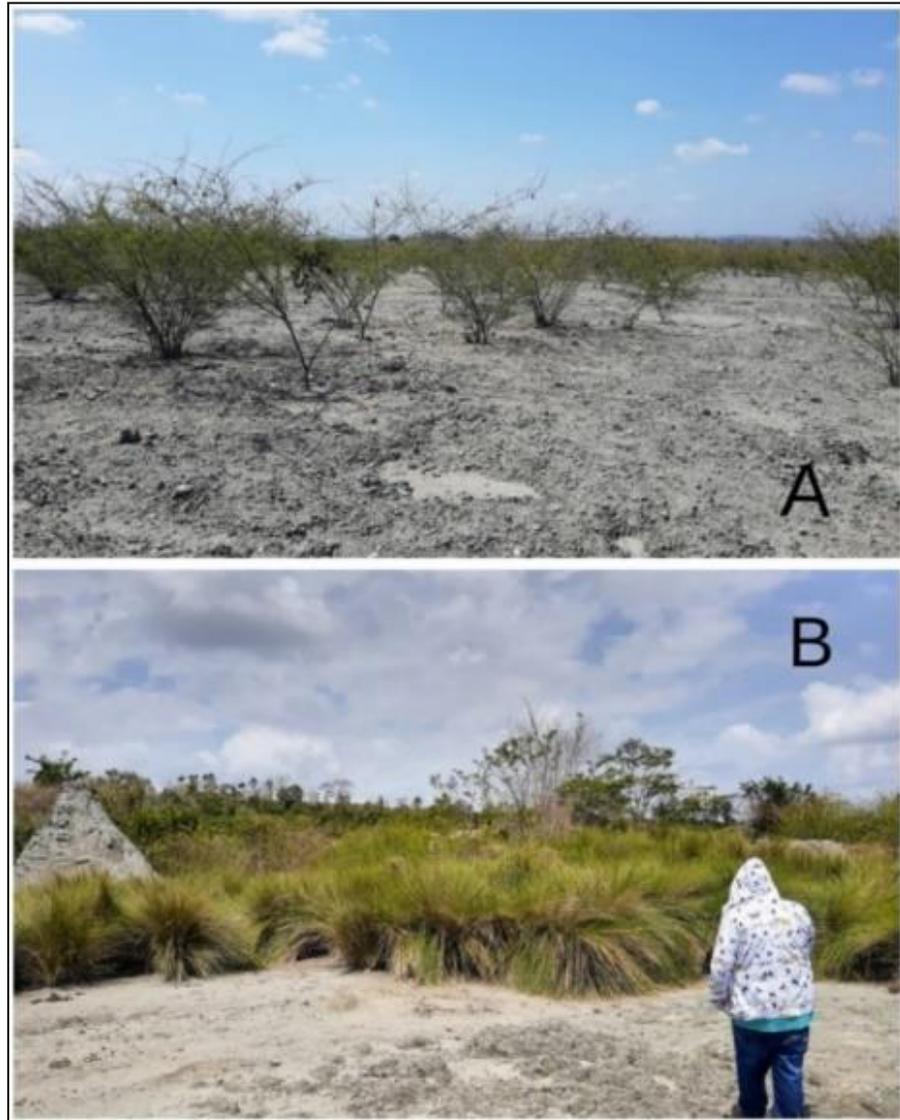


Figura 45. Diferencia de cobertura vegetal en el volcán El Palmar (A) y San Diego (B).

Fuente. Este estudio.

No obstante, la vegetación al ser poca da lugar a la presencia de procesos erosivos como son la formación de surcos, procesos de sufusión, regueros y ambientes estructurales denudacionales como lóbulos de solifluxión que

se hacen presentes en los dos sistemas volcánicos, si bien no se han registrados eventos de remoción en masa o deslizamiento existe evidencia de que dice lo contrario, en este caso lóbulos de soliflucción localizados en la zona S de San Diego y SW del Palmar.

Así mismo, en el volcán San Diego, si observamos la cartografía se presentan surcos con cierta linealidad en la zona SE del volcán permitiendo así identificar la presencia de un fracturamiento en el sistema volcánico, lo cual según Mazzini y Etíope (2017), genera el colapso gradual del cráter lo que puede generar hundimiento y agrietamientos del terreno, este hundimiento puede generar la acumulación de agua en las zonas más afectadas por este proceso, lo cual genera una mayor cantidad de agua retenida por los lodos en el volcán aumentando de forma local el riesgo de deslizamiento tipo rotacional SGC (2018) debido a que el material predominante en esta área son arcillas de tipo esmectita-caolinita y bajos contenidos de ilita y clorita SGC (2018).

En cuanto al volcán El Palmar, en este se encuentran geoformas y procesos erosivos distintivos, entre estos procesos erosivos tenemos la sufusión o piping el cual está asociado fenómenos de erosión hídrica, procesos de colapso y hundimientos los cuales tienden a formarse en todo el sistema pero con una tendencia a formarse en la zona SE del volcán esto en relación a las características de pendiente de las laderas, debido a los fenómenos erosivos presentes y a la posibilidad de evolución de los mismos, se abre la puerta a nuevos riesgos, en relación a la formación de cárcavas, desestabilización de las laderas, colapso del edificio volcánico y movimientos en masa.

En relación a lo anterior, existen otras amenazas que no deben pasar inadvertidas como las filtraciones inactivas presentes en la zona NE del volcán las cuales a pesar de mantenerse en reposo pueden convertirse nuevamente en filtraciones activas como resultado de una perturbación de las mismas de forma gradual como son el aumento y magnificación de

procesos erosivos o de manera repentina como sismos, terremotos e incluso la erupción del volcán, lo que conllevaría a un cambio radical en las características geomorfológicas del volcán, esto en relación a eventos de reactivación o despertar de volcanes inactivos en otras partes del mundo estudiado por diferentes autores como a R.J. Davies, M. Brum. et.al (2006), R. Mellors, D. Kilb, et.al (2007); D. Maestrelli et.al. (2017).

En San Diego y Palmar, se identificaron dos grupos de amenazas; amenazas relacionadas a las geoformas volcánicas y las amenazas relacionadas a las geoformas estructurales, y estos grupos a su vez se relacionan a geoformas del mismo origen, estas amenazas identificadas se representan en la matriz de correlación de la tabla 13:

Tabla 13. Matriz de amenazas.

GEOFORMAS	TIPO DE AMENAZA							
	Geoformas volcánicas sedimentarias				Geoformas estructurales denudativas			
	Expulsión de lodo	Expulsión de bloques	Expulsión de gases	Perdida de vegetación	Hundimiento del terreno	Perdida de materiales	Desestabilización de edificio volcánico	Formación de cárcavas
Depósitos de lodos muy antiguos	X	X		X				X
Depósitos de lodo antiguos	X	X		X				X
Depósitos de lodo recientes	X	X		X				X
Grietas de desecación				X			X	X
Grifos	X	X	X					
Lago salsa	X		X					
Cráter en forma de artesa	X	X	X		X			
Filtraciones inactivas				X			X	
Regueros						X	X	X
Surcos						X	X	X
Sufusión					X		X	X

En las geoformas asociadas a los grupos de amenazas identificados, predominan algunos tipos de materiales que influyen en el proceso que representa una amenaza, así mismo cuentan con rasgos o características distintivos que cumplan la misma función.

Estas características se representan en la tabla 14 con el fin de detallar en mejor medida la dinámica de las amenazas.

Tabla 14. Cuadro de amenazas.

GEOFORMAS	PRINCIPALES RASGOS	MATERIALES DOMINANTES MATERIAL	AMENAZAS ASOCIADOS
Depósitos de lodos muy antiguos	Coloración gris claro, clastos de tamaño medio, presencia de surcos y procesos sufusión.	Estos flujos se constituyen de arcillas grises parduzcas, y localmente de características arenosas de grano fino, con bloques angulares fracturados de areniscas, cuarzo feldespáticas, y localmente calcáreas, fragmentos de calcita y esporádicamente shales limo arcillolíticos.	Perdida de la vegetación, formación de procesos erosivos, se relaciona a la expulsión de flujo de lodos con expulsión de bloques. Movimientos en masa por la inestabilidad de los sedimentos.
Depósitos de lodo antiguos	Coloración de color gris oscuro a claro, presencia de clastos medios a finos presencia de surcos y procesos sufusión.		
Depósitos de lodo recientes	Coloración gris oscura con presencia de clastos finos.		
Grietas de desecación	De coloración gris oscuro, la zona de influencia del lodo presenta agrietamiento e inexistencia de	Arcillas grises parduzcas y localmente de características arenosas de grano fino.	Perdida de la vegetación, formación de procesos erosivos, hundimiento del terreno.

	vegetación, lodo de menor viscosidad.		
Grifos	Diámetros y alturas variables.	Arcillas grises.	Emisión de flujos de lodo. Expulsión de gases y combustión de los mismos aumentando la posibilidad de incendios. Emisión de bloques.
Lago salsa	Van desde pocos centímetros a metros en sus diámetros. Profundidades variables.	Arcillas grises parduzcas, localmente de características arenosas de grano fino	Emisión de flujo de lodos. Expulsión de gases y combustión de los mismos aumentando la posibilidad de incendios. En temporadas de lluvia puede llegar a sobrepasar su límite y desbordarse e inundar áreas circundantes.
	Geoforma cóncava en la cual están localizados la mayor cantidad de	Arcillas grises.	Emisión de gases. Explosiones asociadas a la liberación de lodos.

Cráter en forma de artesa	filtraciones y por ello se define como la zona que deposita y forma el edificio volcánico del Palmar.		Hundimiento gradual por colapso al momento de las erupciones. Emisión de bloques.
Sufusión	Grietas o fracturas en el suelo.	Sedimentos y lodos.	Perdida de materiales, desestabilización del edificio volcánico Formación de cárcavas. Aumento de la inestabilidad del terreno, aumentando la posibilidad de movimientos en masa.
Surcos	Proceso de desintegración del suelo por acción del agua.	Sedimentos y lodos.	Creación de cárcavas, erosión del suelo.
Filtraciones inactivas	Áreas con gran cantidad de lodo de color grisáceo producto de	Arcillas grises	Reactivación de las filtraciones. Modificación de las características geomorfológicas y

	acumulaciones pasadas de material.		estructurales del edificio volcánico.
Regueros	4.60 metros de longitud.	Se producen tan solo en el sustrato de tipo arcilloso.	Procesos de erosión, pérdida de materiales, desestabilización del edificio volcánico. Formación de Cárcavas.

6. CONCLUSIONES.

El volcanismo sedimentario en el municipio de Canalete, Córdoba es un fenómeno muy interesante a nivel geológico y ambiental, puesto que ha traído consigo cambios significativos en las características geomorfológicas al municipio en especial en el sector de La Lorenza, donde a pesar de la cercanía que presentan los dos sistemas estudiados estos poseen cualidades específicas de cada uno como las forma del edificio volcánico, en donde se encuentra que San Diego posee una forma de meseta y el Palmar forma de domo.

Por su parte, los ambientes volcánicos sedimentario y estructural denudacional identificados en las unidades estudiadas, han desarrollado una variedad de geoformas producto de la acción mutua de los procesos endógenos como resultado de la dinámica interna de la tierra y de los volcanes de lodo, los cuales son reflejados en la superficie del terreno, por otro lado, los procesos exógenos han producido y/o modelado las geoformas asociadas a agentes erosivos como el agua y la gravedad.

La características tectónicas y estructurales de la región, conceden a la distribución y alineación de las filtraciones encontradas características propias. Tales características se evidencian en San Diego, donde se presenta un control por estos rasgos estructurales regionales, que a su vez genera una predominancia a la aparición de fracturamiento y colapso en la dirección de tendencia de las fallas suroeste (SW) - noreste (NE) y sureste (SE)- noroeste (NW), así como en El Palmer se presenta una tendencia de dirección NE en el escarpe encontrado, el cual coincide con la dirección

del sistema fallado de la región.

En cuanto a la amenaza por volcanismo, en los alrededores de los volcanes, se asocia a la expulsión de bloques, los flujos de lodos que, por su composición, en la mayoría arcillas expansivas, provocan agrietamientos en el suelo, y los temblores que la actividad volcánica puede causar, todos estos eventos están dirigidos hacia las personas habitantes de la Finca Casa Tabla y las personas y animales que transitan en los alrededores de la zona de influencia para el caso de San Diego, pues esta finca está ubicada a solo 400 metros de la fuente del evento donde los habitantes de la misma, en la última erupción afirmaron escuchar fuertes estrépitos y un leve temblor en los alrededores.

Para el caso de El Palmar, puede asociarse la amenaza de este volcán a los flujos de lodo, que dada las características de los mismos y las pendientes de valores de entre 10 – 20 grados pueden recorrer distancias considerables desde el punto de emisión. Así mismo, dada la emisión de la misma manera de los gases, en su mayoría metano, se presentan incendios generando daños materiales, a la fauna y flora del lugar y representan también riesgos a la vida humana.

El conocimiento sobre la amenaza volcánica en Canalete es limitado, por lo que en este documento se evaluaron los factores que contribuyen a la misma. De igual manera se establecieron parámetros para la caracterización, investigación y realización cartográfica que contribuye a un mejor análisis de la región dado a que se cuenta con pocas investigaciones en el lugar.

7. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda realizar monitoreos de forma periódica para el preciso análisis del comportamiento del fenómeno volcánico.
- Es recomendable llevar a cabo más estudios geológicos, geomorfológicos, geofísicos y geoquímicos detallados de las estructuras volcánicas de lodo de la zona.
- En pro de los efectos de Planes de Ordenamiento Territorial, las zonas con manifestaciones de volcanismo de lodo deben ser zonas de uso restringido para la colonización y construcción de viviendas e infraestructuras.
- Se recomiendan campañas educativas entre la población en aras de la comprensión de las causas y consecuencias de los fenómenos geológicos que se pueden presentar en la región, tales como volcanismo de lodos, sismicidad y remoción en masa.
- Se recomienda la realización de la metodología propuesta por el SGC para la declaratoria de los bienes de interés geológico y paleontológico, como geotopos y geosítio.

8. BIBLIOGRAFÍA.

- Alarcón Socha, J.L, López Sissa. R.A. (2016). Evaluación y cuantificación de la Vans de La amenaza por erosión para los sistemas de cárcavas en el sureste de la ciudad de Tunja. [Pregrado, Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia]. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/10639/11110>
- Alcalá-Reygosa, Jesús, Vázquez-Selem, Lorenzo, & Zamorano, José Juan. (2020). Fechamiento de flujos de lava del Holoceno tardío en el volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba) mediante el isótopo cosmogénico ^{36}Cl y liquenometría e implicaciones para la cronología eruptiva. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 72(1), e260919. Epub 22 de diciembre de 2020. <https://doi.org/10.18268/bsgm2020v72n1a260919>
- Alvarado, Guillermo E., & Vega, Ana E. (2013). La geomorfología de la colada de Cervantes, Volcán Irazú (Costa Rica): descripción de uno de los campos de lava más grande de América Central. *Revista Geológica de América Central*, (48), 99-118. Retrieved March 20, 2021, from http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242013000100006&lng=en&tlng=es.
- Atencio, C. y Mendoza, C. 2018. Evaluación geológica, geotécnica y ambiental de los fenómenos de volcanismo de lodos en la Costa Caribe Colombiana, *Scientia et technica*, 23(1), 108-115.
- Alvarado, Virginia. (2016). La vegetación como factor de control de la erosión. *Repertorio Científico*. 19. 13-17. https://www.researchgate.net/publication/309728073_La_vegetacion_como_factor_de_control_de_la_erosion/citation/download

- Aristizábal, O., Ferrari, A., y Cleverson, S. 2009. Control Neotectónico del diapirismo de lodo en la región de Cartagena, Colombia. I+D Vol. 8, No. 1, 42-50.
- Barros, M. 2021. Caracterización geomorfológica e identificación de las geoamenazas por volcanismo sedimentario en el sector occidental del volcán san diego, Canalete, Colombia. Tesis ingeniero ambiental. Universidad de Córdoba. Montería, Córdoba.
- Bonini, M. (2009). Mud volcano eruptions and earthquakes in the Northern Apennines and Sicily, Italy. *Tectonophysics*, 474(3-4), 723–735. doi:10.1016/j.tecto.2009.05.018 https://www.researchgate.net/publication/223381528_Mud_volcano_eruptions_and_earthquakes_in_the_Northern_Apennines_and_Sicily_Italy.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., y Fidel, J. (2009). La geología evolución geomorfológica y geodinámica externa de la ciudad inca de Machu Picchu cusco-Perú. [http://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/679/1/Carlotto-La_geolog%
c3%ada_evoluci%
c3%b3n_geomorfol%
c3%b3gica.pdf](http://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/679/1/Carlotto-La_geolog%c3%ada_evoluci%c3%b3n_geomorfol%c3%b3gica.pdf)
- Calvo-cases, A., Boix-Fayos, C., Arnau-Rosalen, E., Roxo, M.J. (2011). Carcavas y regueros generados en suelos sódicos, Petrer (Alicante-España). <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3776976.pdf>
- Carreón freyre, D. (2011). Caracterización geo mecánica de los suelos de Iztapalapa México para evaluar el fracturamiento causado por deformación diferencial. <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper986.pdf>
- Carreón freyre, D. (2011). Caracterización geo mecánica de los suelos de Iztapalapa México para evaluar el fracturamiento causado por

deformación diferencial.
<http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper986.pdf>

Carvajal Perico, J.H., y Carrillo Lombana, E.J. (2018). Características de la actividad eruptiva reciente del volcán de lodo de San Diego - La Lorenza municipio de Canalete – Córdoba.

Carvajal Perico, J.H. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. Servicio geológico colombiano.

Carvajal, J., Mendivelso, D., Forero, H., Castiblanco, C., Pinzón, L., y Prada M. 2010. Investigación del diapirismo de lodo y evolución costera del Caribe Colombiano, Sector 1. Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS. Bogotá, p21-222

Carvajal, J., y Mendivelso, D. 2017. Volcanismo de Lodo del Caribe Central Colombiano. Instituto Geológico Colombiano., Bogotá, p7-87.
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Propuesta%20de%20estandarizacion.PDF>

Chaussard, E., Amelung, F., Abidin, H., & Hong, S.-H. (2013). Sinking cities in Indonesia: ALOS PALSAR detects rapid subsidence due to groundwater and gas extraction. *Remote Sensing of Environment*, 128, 150–161. doi:10.1016/j.rse.2012.10.015 https://www.researchgate.net/publication/256850069_Sinking_cities_in_Indonesia_ALOS_PALSAR_detects_rapid_subsidence_due_to_groundwater_and_gas_extraction

Chuveco, E. 1995. Principios de teledetección, Ediciones RIALP.S.A. España

CONAE. Guía de Interpretación Visual de Imágenes Satelitales. Programa Educativo 2Mp.

Cardona, O.D. (s.f.). Evaluación de La amenaza la vulnerabilidad y riesgo.
<https://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/html/cap3.htm>

Dai, J., Wu, X., Ni, Y., Wang, Z., Zhao, C., Wang, Z., & Liu, G. (2012). Geochemical characteristics of natural gas from mud volcanoes in the southern Junggar Basin. *Science China Earth Sciences*, 55(3), 355–367. doi:10.1007/s11430-012-4363-x
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-012-4363-x>

Davies, R. J., Brumm, M., Manga, M., Rubiandini, R., Swarbrick, R., & Tingay, M. (2008). The East Java mud volcano (2006 to present): An earthquake or drilling trigger? *Earth and Planetary Science Letters*, 272(3-4), 627–638. doi:10.1016/j.epsl.2008.05.029 http://seismo.berkeley.edu/~manga/pub_lusi.html

Díaz Rodríguez, J.A. (2012). Los suelos volcánicos lacustres de la Ciudad de México.
http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/eventos/2013/cf/siisg/memorias/documentos/Los_suelos_volcanico.pdf

Duque-Caro, H. 1984. Estilo Estructural, Diapirismo y Episodios de Acrecimiento del Terreno Sinú - San Jacinto en el Noroccidente de Colombia. *Boletín Geológico INGEOMINAS* vol. 27 No.2: 1-29. Bogotá, Colombia.

Digital CM&, D. (06 de diciembre de 2017). Volcán de lodo hizo erupción en Canalete.Canal1.
<https://www.google.com/amp/s/noticias.canal1.com.co/nacional/volcan-de-lodo-hizo-erupcion-en-canalete-cordoba/>

Echavarría, J. 2002. Geometría de la cámara de lodo del volcán de Arboletes. Tesis de Ingeniero Civil, Universidad Nacional De Colombia. Medellín

- Eric, Deville. (2009). Mud Volcano Systems. https://www.researchgate.net/publication/286291175_Mud_volcano_systems.
- Ershov, V. V., Domanskii, A. V., & Levin, B. V. (2010). Modeling of the temperature regime of mud volcano gryphons. *Doklady Earth Sciences*, 435(1), 1529–1534. doi: 10.1134/S1028334X10110267. <https://link.springer.com/article/10.1134/S1028334X10110267>
- Erupción de volcán de lodo en el departamento de Córdoba. [Www2.sgc.gov.co](http://www2.sgc.gov.co). (2020). Retrieved 10 July 2020, from <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Erupci%C3%B3n-de-volc%C3%A1n-de-lodo-en-el-departamento-de-C%C3%B3rdoba.aspx>.
- Etioppe, G. (n.d.). Methane Emission from Mud Volcanoes. *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity*, 141–146. doi:10.1007/1-4020-3204-8_12. https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3204-8_12
- Etioppe, G., & Milkov, A. V. (2004). A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere. *Environmental Geology*, 46(8), 997–1002. https://www.researchgate.net/publication/225710212_A_new_estimate_of_global_methane_flux_from_onshore_and_shallow_submarine_mud_volcanoes_to_the_atmosphere
- Etioppe, G., Feyzullayev, A., & Baciu, C. L. (2009). Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin. *Marine and Petroleum Geology*, 26(3), 333-344. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2008.03.001 https://www.researchgate.net/publication/222664531_Terrestrial_methane_seeps_and_mud_volcanoes_A_global_perspective_of_gas_origin

Esquema de Ordenamiento Territorial. Canalete 2001 – 2010.

EVANS, R. J., STEWART, S. A., & DAVIES, R. J. (2008). The structure and formation of mud volcano summit calderas. *Journal of the Geological Society*, 165(4), 769–780. doi:10.1144/0016-76492007118 https://www.researchgate.net/publication/275507887_Structural_controls_on_mud_volcano_vent_distributions_Examples_from_Azerbaijan_and_Lusi_east_Java.

El Tiempo, (26 de agosto de 2008). Erupción volcán de lodo en Canalete, Córdoba. El Tiempo. <https://www.google.com/amp/s/www.eltiempo.com/amp/archivo/documento/CMS-4467769>

FAO. (2015). Año internacional de los suelos. <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>. <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/285875/>

Frank, W. B., Shapiro, N. M., & Gusev, A. A. (2018). Progressive reactivation of the volcanic plumbing system beneath Tolbachik volcano (Kamchatka, Russia) revealed by long-period seismicity. *Earth and Planetary Science Letters*, 493, 47–56. doi: 10.1016/j.epsl.2018.04.018. <https://www.sciencedirect.com/science/article/am/pii/S0012821X18302218>

Gallego S., & Ventura E. 2019. Propuesta para el desarrollo de una aplicación SIG móvil orientada a la comercialización de productos agrícolas. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/13105/GallegoMaldonadoStephanie2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

García-Quintana, Alejandro, Goguitchaichvili, Avto, Morales, Juan, Cervantes-Solano, Miguel, Osorio-Ocampo, Susana, Macias, José Luis, & Urrutia-Fucugauchi, Jaime. (2016). Datación magnética de rocas

volcánicas formadas durante el Holoceno: caso de flujos de lava alrededor del Lago de Pátzcuaro (campo volcánico Michoacán-Guanajuato). *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 33(2), 209-220. Recuperado en 20 de marzo de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S102687742016000200209&lng=es&tlng=es.

Glosario de geografía general. Alicante.com. <https://glosarios.servidor-alicante.com/geografia-general/escarpe-de-falla>

Gottsmann, J., Wooller, L., Martí, J., Fernández, J., Camacho, A. G., Gonzalez, P. J., ... Rymer, H. (2006). New evidence for the reawakening of Teide volcano. *Geophysical Research Letters*, 33(20). doi:10.1029/2006gl027523. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2006GL027523>

Graue, K. (2000). Mud volcanoes in deepwater Nigeria. *Marine and Petroleum Geology*, 17(8), 959–974. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264817200000167>.

Grupo energía Bogotá (2014) REFUERZO SUROCCIDENTAL A 500KV ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO LA VIRGINA-ALFEREZ. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.grupoenergiabogota.com/transmision/proyectos-en-desarrollo/refuerzo-suroccidental-500kv-upme-04-2014&ved=2ahUKEwi9gYX7jpDwAhVEAqwKHbiTDPYQFjAAegQIBBAC&usg=AOvVaw1TxbNbCYR5hRIIbTerWCrH>

Hachikubo, A., Minami, H., Yamashita, S., Khabuev, A., Krylov, A., Kalmychkov, G., ... Khlystov, O. (2020). Characteristics of hydrate-bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal).

Scientific Reports, 10(1). doi:10.1038/s41598-020-71410-2.
<https://www.nature.com/articles/s41598-020-71410-2>

Herazo, M., y Torreglosa, E. 2021. Caracterización geomorfológica y correlación con el tipo de amenazas por volcanismo sedimentario, sector suroriental del Volcán San Diego. Tesis ingeniería ambiental. Universidad de Córdoba. Montería, Córdoba.

Hernandez, P. 2008. Cartografía geológica y modelamiento estructural de las cuencas de Urabá y Sinú-san jacinto a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos y monitoreo sísmico. Universidad Nacional De Colombia. Bogotá D.C.).
http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/5_Informe_Final.pdf

Herrera, C., Diaz, C. 2018. Evaluación geológica, geotécnica y ambiental de los fenómenos de volcanismo de lodos en la Costa Caribe Colombiana: Scientia et Technica 23 (01), 108-113.

Hovland, M., Hill, A., & Stokes, D. (1997). The structure and geomorphology of the Dashgil mud volcano, Azerbaijan. *Geomorphology*, 21(1), 1–15.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X97000342>.

Ibáñez, JJ. (Julio 2013). Erosión del suelo por sufusión piping o tubificación.
[https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2013/07/30/142877#:~:text=La%20sufusi%C3%B3n%20podr%C3%ADa%20\(ver%20tambi%C3%A9n,evacuados%20por%20flujos%20h%C3%ADdricos%20subsuperficiales%2C](https://www.madrimasd.org/blogs/universo/2013/07/30/142877#:~:text=La%20sufusi%C3%B3n%20podr%C3%ADa%20(ver%20tambi%C3%A9n,evacuados%20por%20flujos%20h%C3%ADdricos%20subsuperficiales%2C)

Ida, Y. (2009). Dependence of volcanic systems on tectonic stress conditions as revealed by features of volcanoes near Izu peninsula,

Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 181(1-2), 35–46. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.12.006.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377027308006549>

IGAC. 2017. interpretación de imágenes de sensores remotos aplicada a levantamientos de cobertura de la tierra. <http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/procedimientos%202008/2017/M407000317%20V1%20Interpretacion%20de%20imagenes%20de%20sensores%20remotos%20aplicada%20a%20levantamientos%20de%20cobertura%20de%20la%20tierra.pdf>

Instituto colombiano de geología y minería [ingominas], diagnóstico de la amenaza por volcanismo de lodos en el sector de la lorenza el guineo municipio de canalete departamento de córdoba. Bucaramanga, colombia, 2001

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales; IDEAM. (2015) Unidades geomorfológicas de territorio colombiano, Santa Fe de Bogotá D.C. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005192/unidad esgeomorf/unidgeom.pdf>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) 2016. Caracterización de la cuenca del río la vieja plana de ordenación y manejo de la cuenca del RioVieja. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/202002/Documento_General_POMCA_LaVieja.pdf&ved=2ahUKEwj1ip_vjZDwAhVJ5awKHa66C4gQFjAAegQIBBAC&usg=AOvVaw2LUMohvqTNDEDNfuPZL4-Y

Instituto Geográfico Agustín Codazzi, (IGAC). (2018) Glosario de términos geomorfológicos aplicados a levantamientos topográficos de suelos, Grupo interno de trabajo.

<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/procedimientos%202008/2018/G40700-03%2018V3%20Glosario%20de%20terminos%20geomorfologicos%20aplicados%20a%20levantamientos%20de%20suelos.pdf&ved=2ahUKEwjB49vBkJDwAhWGhK0KHXmzAA4QFjAAegQIBRAC&usg=AOvVaw2ibHsyNYIvfcfbXXw2E9OI>

INGEOMINAS, subdirección de amenazas geoambientales centro operativo regional Bucaramanga (2001). Diagnóstico de la amenaza por volcanismo de lodo en el sector de la Lorenza-el Guineo, municipio de canalete, departamento de Córdoba

Istadi, B. P., Pramono, G. H., Sumintadireja, P., & Alam, S. (2009). Modeling study of growth and potential geohazard for LUSI mud volcano: East Java, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), 1724–1739. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2009.03.006. <http://seismo.berkeley.edu/~manga/istadi2009.pdf>

J. Gallindo- Zaldívar & L.M Nieto (1994). Geometry Of mud volcanoes and folds of the mediterranean ridge, south of crete (eastern mediterranean) university of Jaén, rabida.uhu.es/dspace/bitstream/handle/10272/13947/Geometria-de-los.pdf?sequence=2

J.C. Carracedo*, M. Paterne**, H. Guillou**, F. J. Pérez Torrado*'-*, R. Paris****, E. Rodríguez Badiola***** and A. Hansen* (2003) Dataciones Radiométricas (14c Y Kiar) Del Teide Y El Rift Noroeste, Tenerife, Islas Canarias, Universidad de Las Palmas dr Gran Canaria, España, <https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/1133/1/1915.pdf>

Kazama, M., Kataoka, S., & Uzuoka, R. (2012). Volcanic mountain area disaster caused by the Iwate–Miyagi Nairiku Earthquake of 2008, Japan. *Soils and Foundations*, 52(1), 168–184. doi:

10.1016/j.sandf.2012.01.

003..

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003808061200004>

2

Kopf, A. 2020. Significance of mud volcanism. Review Of Geophysics 40(2): 2-52

León, R., Somoza, L., Medialdea, T., Vázquez, J. T., González, F. J., López-González, N.,... Díaz-del-Río, V. (2012). New discoveries of mud volcanoes on the Moroccan Atlantic continental margin (Gulf of Cádiz): morpho-structural characterization. *Geo-Marine Letters*, 32(5-6), 473–488. doi:10.1007/s00367-012-0275-1

Leyva, P. 2011. Metodología para la identificación y determinación de geoformas y sus principales variaciones temporales mediante el uso de sensores remotos. caso servita. Tesis Magister en Ciencias Geología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia

Llinares, M; Ortiz, R.; Marreno, JM. (2018) Dirección general de protección civil y emergencias (DGPCE). Ministerio del interior. España. Riesgo Volcanico. (1st ed.). Madrid España. Retrieved from <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/VLC-Guia-Riesgo-Volcanico.pdf>

López Bermúdez, F., y Torcal Sáinz, L. (1998). Procesos de erosión en túnel (piping) en cuencas sedimentarias de Murcia España estudio preliminar mediante difracción de rayos x y microscópicos electrónicos de barrido. *Papeles de geografía física*, 11, 7-20. <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42031/40401>

La Razón, (5 de 12 de 2017). Volcan de lodo 'La Lorenza' en canaleta, hizo erupción confirman autoridades locales. La Razón.<https://larazon.co/temas-del-dia/volcan-de-lodo-la-lorenza-en-canaleta-hizo-erupcion-confirman-autoridades-locales/>

- Maestrelli, D., Bonini, M., Delle Donne, D., Manga, M., Piccardi, L., & Sani, F. (2017). Dynamic Triggering of Mud Volcano Eruptions During the 2016-2017 Central Italy Seismic Sequence. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11), 9149–9165. doi:10.1002/2017jb014777
- Malinverno, A., & Ryan, W. B. F. (1986). Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, 5(2), 227–245. doi:10.1029/tc005i002p00227
- Manga, M., & Brodsky, E. (2006). SEISMIC TRIGGERING OF ERUPTIONS IN THE FAR FIELD: Volcanoes and Geysers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1), 263–291. doi: 10.1146/annurev.earth.34.031405.125125
- Martínez, J.; Martín, M., 2010, Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente, Madrid, Red Nacional de Teledetección Ambiental, 197 pp.)
- Mazzini, A. y Etiope, G. 2017. Mud volcanism: an updated review. *Earth-Science Reviews*, 168: 81-112
- Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G. G., Aloisi, G., Planke, S., Malthes-Sørenssen, A., & Istadi, B. (2007). Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia. *Earth and Planetary Science Letters*, 261(3-4), 375–388. doi: 10.1016/j.epsl.2007.07.001
- Medina, L. 2014. Automatización del trazado de geoformas del relieve mediante sistemas de información geográfica, a partir de un modelo digital de terreno. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20915>
- Mellors, R., Kilb, D., Aliyev, A., Gasanov, A., & Yetirmishli, G. (2007). Correlations between earthquakes and large mud volcano

eruptions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B4). doi:10.1029/2006jb004489.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2006JB004489>

Milkov, A. 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. *Marine Geology*, 167(1-2): 29-42

Montiel A, K., Maldonado B, H., y Gouviea M, E.L. (2007). Amenaza por inestabilidad de las laderas en la cuenca del Río mocoy -Andes venezolano. *Espacio y desarrollo*, 19, 1-16.
<http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/10639/11110>

Navarro, A., Lourenço, N., Chorowicz, J., Miranda, J. M., & Catalão, J. (2009). Analysis of geometry of volcanoes and faults in Terceira Island (Azores): Evidence for reactivation tectonics at the EUR/AFR plate boundary in the Azores triple junction. *Tectonophysics*, 465(1-4), 98–113. doi: 10.1016/j.tecto.2008.10.020

Okubo, C. H. (2016). Morphologic evidence of subsurface sediment mobilization and mud volcanism in Candor and Coprates Chasmata, Valles Marineris, Mars. *Icarus*, 269, 23–37.
https://www.researchgate.net/publication/290789383_Morphologic_evidence_of_subsurface_sediment_mobilization_and_mud_volcanism_in_Candor_and_Coprates_Chasmata_Valles_Marineris_Mars

Onderdonk, N., Mazzini, A., Shafer, L., & Svensen, H. (2011). Controls on the geomorphic expression and evolution of gryphons, pools, and caldera features at hydrothermal seeps in the Salton Sea Geothermal Field, southern California. *Geomorphology*, 130(3-4), 327–342. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.04.014.
https://www.researchgate.net/publication/228411399_Controls_on_the_geomorphic_expression_and_evolution_of_gryphons_pools_and_caldera_features_at_hydrothermal_seeps_in_the_salton_sea_geothermal_field_southern_california

ution_of_gryphons_pools_and_caldera_features_at_hydrothermal_seeps_in_the_Salton_Sea_Geothermal_Field_Southern_California

- Peralta Huertas, G, Badilla Coto, E. (2015). El área deslizamiento de torito: un proceso histórico de amenaza. *Revista en torno a la prevención.*, 14, 1-15. López Bermúdez, F., y Torcal Sáinz, L. (1998). Procesos de erosión en túnel pipí en cuencas sedimentarias de Murcia España estudio preliminar mediante difracción de rayos x y microscópicos electrónicos de barrido. *Papeles de geografía*
- Quintero, J. 2012. Interpretación sísmica de volcanes de lodo en la zona occidental del abanico del delta del río Magdalena, Caribe colombiano. Tesis Geólogo, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia
- Rainone, M. L., Rusi, S., & Torrese, P. (2015). Mud volcanoes in central Italy: Subsoil characterization through a multidisciplinary approach. *Geomorphology*, 234, 228–242. doi: 10.1016/j.geomorph.2015.01.026. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X1500046X>
- Robertson, K., Flórez, A. y Ceballos, J. 2002. Geomorfología volcánica, actividad reciente y clasificación en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 11(1), 37-76
- Rodríguez, A. y Fernández, J. 2015. Las geoformas volcánicas y su modelado morfométrico con Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. 23(40), 40-48
- Rodríguez, O.; Arredondo, H. 2005. Manual para el manejo y procesamiento de imágenes de satélite del sensor remoto Modis de la Nasa, aplicado en estudios de ingeniería civil. Tesis ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7050/tesis123.pdf?sequence>

- Rosero Cuesta, J. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/download/130/115/>
- Rudolph, M. L., & Manga, M. (2010). Mud volcano response to the 4 April 2010 El Mayor-Cucapah earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 115(B12). doi: 10.1029/2010jb007737. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2010JB007737>
- Sacristan, F. 2006. La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *evista AquaTIC(24)*: 13-41
- Sahling, H., Bohrmann, G., Artemov, Y. G., Bahr, A., Brüning, M., Klapp, S. A., ... Wallmann, K. (2009). Vodyanitskii mud volcano, Sorokin trough, Black Sea: Geological characterization and quantification of gas bubble streams. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), 1799–1811. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2009.01.010 <https://publications.marum.de/1554/>
- Servicio Geológico Colombiano. 2015. Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1: 100.000 ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional identificados por el Servicio Geológico Colombiano grupo 2: zonas Sur A y sur B. Memoria explicativa, geología de la plancha, 304. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B15/23008010024811/Documento/Pdf/2105248111101000.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano. (SGC). (2016) Memoria explicativa mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa, escala 1:100.000, PLANCHA 465-CHURUYACO. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://recordcenter.sgc.gov.co/B8/21003010028433/Documento/Pdf/2105284331>

101000.pdf&ved=2ahUKEwjLgpvZj5DwAhUHIKwKHUkuCxUQFj
AAegQIBRAC&usg=AOvVaw0vPIDCBsmW1XzUA5oE4Y0D

Shakirov, R., Obzhirov, A., Suess, E., Salyuk, A., & Biebow, N. (2004). Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area. *Geo-Marine Letters*, 24(3). doi:10.1007/s00367-004-0177-y <https://epic.awi.de/id/eprint/13148/>

Skinner, J. A., & Mazzini, A. (2009). Martian mud volcanism: Terrestrial analogs and implications for formational scenarios. *Marine and Petroleum Geology*, 26(9), 1866–1878. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X97000342>

Skinner, J. A., & Tanaka, K. L. (2007). Evidence for and implications of sedimentary diapirism and mud volcanism in the southern Utopia highland–lowland boundary plain, Mars. *Icarus*, 186(1), 41–59. doi:10.1016/j.icarus.2006.08.013. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103520306175>

Somoza, L. (2003). Seabed morphology and hydrocarbon seepage in the Gulf of Cádiz mud volcano area: Acoustic imagery, multibeam and ultra-high resolution seismic data. *Marine Geology*, 195(1-4), 153–176. doi:10.1016/s0025-3227(02)00686-2

Somoza, L., Medialdea, T., León, R., Ercilla, G., Vázquez, J., Farran, M., Hernández J., González, J., Gonzalez, F., Juan, C. y Fernandez, M. 2012. Structure of mud volcano systems and pockmarks in the region of the ceuta contourite depositional system (western alborán sea). *Marine Geology* 332 – 334: 4 – 26

Serrano, N. (10 de junio de 2020). Pánico por actividad de volcán de Canalete. El

Universal.<https://m.eluniversal.com.co/regional/cordoba/panico-por-actividad-de-volcan-de-canalete-en2953251>

Tempfli, K., Huurneman, G., Bakker, W., Janssen, L., Feringa, W., Gieske, A. y Woldai, T. (2009). Principles of remote sensing: an introductory textbook. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation

Universidad de la Republica Uruguay. (2018). ¿Qué son los Datos Espaciales y los Sistemas de Información Geográfica? “*Introducción a Los Datos Espaciales y Sistemas de Información Geográfica,*” 18–20

Vidal, N., & Merle, O. (2000). Reactivation of basement faults beneath volcanoes: a new model of flank collapse. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 99(1-4), 9–26. doi:10.1016/s0377-0273(99)00194-8.

https://www.researchgate.net/publication/248257043_Reactivation_of_basement_faults_beneath_volcanoes_A_new_model_of_flank_collapse

Vega O, J., y Carvajal, J.H. (1992). Características del volcanismo de lodo en el sector la Lorenza (Córdoba). <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/volcanismo-lodo.pdf>

Wan, Z., Yao, Y., Chen, K., Zhong, S., Xia, B., & Sun, Y. (2018). Characterization of mud volcanoes in the northern Zhongjiannan Basin, western South China Sea. *Geological Journal*. doi:10.1002/gj.3168. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/gj.3168>

Werlinger, C., Alveal, K., & Romo, H. (2004). *Biología marina y oceanografía: conceptos y procesos*. Consejo Nacional del Libro y la Lectura

Yang, T. F., Yeh, G.-H., Fu, C.-C., Wang, C.-C., Lan, T.-F., Lee, H.-F., ...
Sung, Q.-C. (2004). Composition and exhalation flux of gases from
mud volcanoes in Taiwan. *Environmental Geology*, 46(8), 1003–
1011. doi:10.1007/s00254-004-1086-0.

https://www.researchgate.net/publication/225160208_Composition_and_exhalation_flux_of_gases_from_mud_volcanoes_in_Taiwan

Zinck, J.A. (2012). *Geopedología, elementos de geomorfología para estudios de suelos y riesgos naturales*. Kapelusz

9. ANEXOS.

