# CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y CORRELACIÓN CON EL TIPO DE AMENAZAS POR VOLCANISMO SEDIMENTARIO, SECTOR SURORIENTAL DEL VOLCÁN SAN DIEGO

**ELIANA JUDITH TORREGLOSA OLIVERA**

**MIGUEL ANTONIO HERAZO ROMERO**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**INGENIERIA AMBIENTAL**

**MONTERIA, CORDOBA**

**2021**

# CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA Y CORRELACIÓN CON EL TIPO DE AMENAZAS POR VOLCANISMO SEDIMENTARIO, SECTOR SURORIENTAL DEL VOLCÁN SAN DIEGO

**ELIANA JUDITH TORREGLOSA OLIVERA**

**MIGUEL ANTONIO HERAZO ROMERO**

**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):**

**ZORAYA YASQUINE MARTÍNEZ LARA, M.Sc. Geomorfología y Suelos**

**DORIS MEJÍA ÁVIL, Ph.D. Ingeniería Geográfica**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERIA AMBIENTAL**

**MONTERIA, 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**

*A mi compañero de toda la vida, mi Amigo fiel, quien ha sido mi sostén, mi fuerza y mi principal razón de existir desde que le conocí, quien le da valor y sentido completo a mi vida.*

*A mi madre, quien es la persona más importante de mi vida, por siempre creer en mi, porque se merece mi mundo entero, porque está encriptada en lo más profundo de mi ser, porque es mi hogar, el lugar en el que me siento más segura y porque gran parte de lo que soy se lo debo a ella.*

*A mi yo del futuro para recordarle que a pesar de ser pequeña, sí pudo, que sí fue capaz y que tiene infinitas razones para sentirse orgullosa de sí misma.*

*Eliana Judith Torreglosa Olivera.*

*Gracias a mis padres, Damaris y Miguel por enseñarme que la educación es la mejor herencia que me pueden brindar, al igual que mis hermanos y otros familiares que me acompañaron en este proceso.*

*Gracias a mis amigos y colegas por acompañarme en esta etapa de mi vida, de ellos aprendí muchas cosas las cuales me ayudaron a crecer como persona.*

*Gracias a María Carolina por acompañarme en los buenos momentos en esta etapa de mi vida y nunca faltar en los malos, gracias por ser y estar.*

*A Eliana, por elegirme como su compañero de tesis y juntos desarrollarla.*

*A mis profesores, gracias por aportar su concomimiento de la mejor manera mediante el transcurso de mi carrera, en especial a las profesoras Zoraya y Doris por creer en nosotros y acompañarnos en el desarrollo de esta tesis.*

*A todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron con la realización de esta tesis.*

*Miguel.*

***Agradecimientos especiales a:***

*A nuestra alma máter la Universidad de Córdoba y en especial, a nuestro departamento de Ingeniería Ambiental por habernos acogido todos estos años y proporcionarnos las herramientas necesarias para aprender y crecer profesionalmente.*

*A nuestra directora Zoraya Yasquine Martínez Lara por ser tan especial, por toda su paciencia y dedicación, las cuales han sido fundamentales en este proceso y por supuesto, por ser ejemplo no solo como profesional sino también como persona. Estamos infinitamente agradecidos con usted.*

*A nuestra codirectora Doris Mejía Ávila por todo su apoyo y acompañamiento en este proyecto y desde luego, a la ingeniera Mónica Cantero, los geógrafos Mauricio Martínez e Ingris Osorio y a todos nuestros profesores en general, por aportar un granito de arena en nuestra formación como Ingenieros Ambientales.*

*A la hacienda Casaetabla por prestar sus instalaciones para realizar esta investigación y por la atención prestada.*

*A la CVS (Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y San Jorge) por proporcionar insumos base para la realización de esta investigación.*

**TABLA DE CONTENIDO**

## Contenido


RESUMEN ..... 12

1. INTRODUCCION ..... 14
2. OBJETIVOS ..... 17
3. REVISION BIBLIOGRAFICA ..... 18
4. ESTADO DEL ARTE ..... 21
5. MATERIALES Y METODOS ..... 26
   - 5.1. TIPO DE ESTUDIO ..... 26
   - 5.2. MATERIALES ..... 26
   - 5.3. AREA DE ESTUDIO ..... 26
   - 5.4. METODOLOGIA ..... 28
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES ..... 34
   - 6.1. CARACTERIZACION DE LOS RASGOS GEOMORFOLOGICOS. ..... 34
     - 6.1.1. FILTRACIONES ..... 35
   - 6.2. CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA ..... 56
     - 6.2.1. GEOMORFOESTRUCTURA ..... 56
     - 6.2.2. PROVINCIA ..... 58
     - 6.2.3. REGIÓN ..... 58
     - 6.2.4. UNIDAD ..... 58
     - 6.2.5. SUBUNIDADES ..... 58
     - 6.2.6. COMPONENTES ..... 63
   - 6.3. CORRELACION DE AMENZAS. ..... 72
     - 6.3.1. EXPULSION DE FLUJO DE LODO ..... 74
     - 6.3.2. INCENDIOS ..... 75
     - 6.3.3. EXPULSION VIOLENTA POR BRECHA DE LODO ..... 76
7. CONCLUSIONES. ..... 80
8. RECOMENDACIONES ..... 82
9. BIBLIOGRAFIA. ..... 84

ANEXOS ..... 88

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Características de grifos salpicaduras ..... 35
Tabla 2. Características de los grifos burbujeadores. ..... 37
Tabla 3. Características de grifos clásticos. ..... 39
Tabla 4. Características de grifos extintos. ..... 41
Tabla 5. Características de los conglomerados de grifos. ..... 44
Tabla 6. Características de las salsas. ..... 46
Tabla 7. Características de los conglomerados de salsas ..... 48
Tabla 8. Características de las piscinas. ..... 48
Tabla 9. Jerarquización de rasgos geomorfológicos encontrados en el volcán San Diego. ..... 57
Tabla 10. Características de las subunidades ..... 60
Tabla 11. Características de los conglomerados de salsas. ..... 61
Tabla 12. Características de las coladas. ..... 62
Tabla 13 Inventario de elementos encontrados en la zona 2 ..... 66
Tabla 14. Inventario de componentes encontrados en la Zona 3. ..... 68
Tabla 15. Cantidad de componentes encontrados en la ZONA 4 ..... 70
Tabla 16. Matriz de correlación de amenazas. Fuente: Propia. ..... 73

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de jerarquización geomorfológica. Fuente: (Carvajal 2012) ..... 19
Figura 2. Mapa del sector Suroriental volcán San Diego. Fuente: Propia. ..... 27
Figura 3. Imagen Worldview 3, volcan de lodo San Diego ..... 29
Figura 4. Imagen Planet Explore, volcán de lodo San Diego ..... 29
Figura 5Mosaico de imágenes captadas mediante drones. Volcán de lodo San Diego sector suroriental ..... 30
Figura 6. Clasificación de geoformas encontradas. Fuente: Propia. ..... 34
Figura 7. Grifos salpicaduras. (A) Cráter (B) Forma cónica. Fuente: Propia. ..... 36
Figura 8. Grifos observados desde el mosaico de imágenes. A. Grifo salpicadura. B. grifo salpicadura ..... 36
Figura 9. Grifos burbujeadores. (A) Cráter (B) Forma. Fuente: Propia ..... 38
Figura 10. Grifos observados desde el mosaico de imágenes. A. Grifo burbujeador. B. grifo burbujeador ..... 38
Figura 11. Grifo clástico. Fuente: Propia ..... 40
Figura 12. Grifos observados desde el mosaico de imágenes. A. grifo clástico. B. grifo clástico ..... 40
Figura 13. Grifo extinto. (A) En temporada seca (B) En temporada lluvia ..... 43
Figura 14. Grifos observados desde el mosaico de imágenes. A. grifos extinto. B. grifo extinto. ..... 43
Figura 15. Conglomerado de grifos. Fuente: Propia ..... 43
**Figura 16. Salsa. (A) Cráter polígono rojo (B) Colada polígono azul** ..... 45
Figura 17. Salsas observadas desde mosaico de imágenes. A. Salsa. B. Salsa ..... 45
Figura 18. Piscina. Fuente: Propia. ..... 49
Figura 19. Pisicna observada desde mosaico de imágenes. ..... 50
Figura 20. Coladas. En la imagen, el polígono verde refleja una colada reciente; el polígono rojo representa una colada antigua). Fuente: Propia. ..... 51
Figura 21. Colada antigua con grietas de desecación. Fuente: Propia ..... 52
Figura 22. Colada reciente. Fuente: Propia ..... 53
Figura 23. Colada de flujo de lodo. Fuente: Propia. ..... 54
Figura 24. (A) Colada desecada de brecha de lodo. (B) Bloques producto de expulsión de brecha. Fuente: Propia. ..... 55
Figura 25. Mapa de subunidades geomorfológicas. Fuente: Propia ..... 59
FIGURA 26. Mapa de componentes en el sector suroriental del Volcán San Diego - ZONA 1Fuente: Propia. ..... 65
FIGURA 27Mapa de componentes en el sector suroriental del volcán San Diego - ZONA 2. Fuente: Propia. ..... 67
FIGURA 28. Mapa de componentes en el sector suroriental del volcán San Diego - ZONA 3. Fuente: Propia ..... 69
FIGURA 29. Mapa de componentes en el sector suroriental del volcán San Diego – ZONA. Fuente: Propia. ..... 71
Figura 30. Clastos encontrados en la zona (A) Clasto (B) clasto. Fuente: Propia. ..... 77

Figura 31. Mapa de amenazas en el sector suroriental del volcán San Diego..... 79
Figura 32. Mapa de componentes volcan San Diego sector suroriental..... 91

**RESUMEN**

En Canalete, Córdoba se encuentra el volcán de lodo San Diego, objeto de esta investigación, la cual tiene como objetivo realizar la caracterización de las geoformas presentes. Fueron encontradas filtraciones como grifos (salpicaduras, clásticos, extintos, burbujeadores), salas y piscinas, depósitos como coladas (antiguas y recientes). La caracterización de estas geoformas fue realizada mediante imagines tomadas a través de dron y visitas en campo obteniendo así una cartografía geomorfológica a una escala de 1:500 logrando determinar la mayor cantidad de geoformas en el área de estudio para realizar una correlacion entre estas y la ocurrencia de posibles amenazas, se estableció que los grifos salpicaduras se asocian a amenzas por incendio por la cantidad de gases que expulsan a la superficie, los grifos burbujeadores y salsas fueron relacionados a amenzas por expulsión de lodo y los grifos clásticos a amenazas por expulsión de brecha de lodo.

Palabras claves: caracterización, cartografía, filtraciones, depósitos, amenazas.

## ABSTRACT

The San Diego mud volcano is located in Canalete, Córdoba, the object of this research, which aims to characterize the present geoforms. Leaks such as gryphons (splatters , bubblers , clast-rich,and extintic), sauces, and pools, deposits such as flows (old and recent) were found. The characterization of these geoforms was carried out by means of images taken through drones and field visits, thus obtaining a geomorphological cartography at a scale of 1: 500, managing to determine the largest number of geoforms in the study area to make a correlation between them and the occurrence of possible threats, It was established that splatters gryphons are associated with fire threats due to the amount of gases that they expel to the surface, bubblers gryphons and sauces were related to threats due to expulsion of mud and clastic taps to threats due to expulsion of a mud gap.



Keywords: characterization, cartography, seepage, deposits, threats.

# 1. INTRODUCCION

Los volcanes de lodo pueden ser estructuras geológicas de gran tamaño y larga vida, que se asemejan morfológicamente a los volcanes magmáticos. Episódicamente, producen erupciones violentas de grandes cantidades de gas mezcladas con agua, petróleo, lodo y fragmentos de rocas que forman la llamada “brecha de lodo”. A diferencia de un volcán de lodo, un diapiro de lodo es una estructura intrusiva caracterizada por una masa de sedimentos ricos en arcilla que migran lentamente hacia arriba, sin que exista descarga de fluidos en superficie (Kopf 2002). Un volcán de lodo suele producirse encima del diapiro, como resultado de la migración de fluidos directamente a lo largo del cuerpo del diapiro de lodo (Milkov 2000) y pueden representar según algunos autores, la última manifestación de diapirismo (Kopf, 2002; Chen et al. 2014). Sin embargo, existen volcanes de lodo que no tienen relación con el diapirismo de lodo (Roberts 2011). Cardona (1993) menciona que la amenaza está definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado. A nivel internacional existe un importante registro de volcanes de lodo y su relación entre su actividad eruptiva y la ocurrencia de amenazas como expulsión de flujo y brecha de lodo e incendios por el gas expulsado, así como las consecuencias socio económicas en las comunidades aledañas. El periódico El Confidencial (2016) de España, reportó que la erupción del volcán de lodo Lusi en Java, el 29 de mayo de 2006, sepultó campos de arroz, fábricas, escuelas y multitud de hogares bajo el lodo caliente; en la isla, alrededor de 35.000 personas tuvieron que mudarse y 13 murieron.

En el año 2001, una llamarada de casi 300 metros de altura rodeada de un denso humo negro y un montón de barro fueron desprendidos por un volcán en Azerbaiyán mediante una explosión que provocó un fuego visible a 15 kilómetros de distancia (La voz del Sandinismo 2013). Ahora bien, estudios realizados por el Servicio Geológico Colombiano -SGC- (2017) afirman que la mayor ocurrencia del volcanismo sedimentario en Colombia se presenta en la Región Caribe y que es un fenómeno asociado con diversas amenazas. Así mismo, en el municipio de Canalete - Córdoba se identifican varios sistemas volcánicos, entre ellos, el volcán San Diego (objeto de estudio de esta investigación) en el cual se han presentado varios eventos eruptivos y de incendios, señalando la erupción más reciente en el año 2017 (Carvajal, 2018). Sin embargo, cabe resaltar que según el diario La Razón (2020) se registró actividad a principios del año 2020, donde una cantidad considerable de lodo fue expulsado a la superficie llegando incluso a bloquear vías en la zona. La población situada en la zona de influencia está expuesta a amenazas generadas por la actividad eruptiva del volcán ya que, con la expulsión de la brecha de lodo, los terrenos que usan para su sustento pueden quedar sepultados al igual que sus viviendas o estas pueden ser incendiadas por los gases provenientes del volcán. Ahora bien, a pesar de que en Colombia se han realizado estudios con relación a la caracterización geomorfológica del volcanismo sedimentario, en la mayoría de los casos la información registrada se encuentra desactualizada en comparación con los estándares internacionales, además, en el caso del volcán San Diego, hay una ausencia considerable de información cartográfica y temática relacionada con los rasgos o características geomorfológicas como: filtraciones y materiales expulsados por él y su relación con sus potenciales amenazas; esto se convierte en una limitante al momento de establecer o desarrollar planes encaminados al manejo y reducción de riesgos o incluso en aquellos relacionados con los ejercicios de ordenamiento del territorio (EOT). Características como particularidad y diversidad de las

filtraciones encontradas, erupciones continuas desde los últimos 50 años hacen que esta zona sea de interés en el desarrollo de la investigación. Por esta razón, en el documento presentado a continuación, se plasman los resultados obtenidos a partir de una investigación en la cual se caracterizaron las distintas geoformas que se encontraron en la zona de interés, los materiales que emiten y su alcance (teniendo en cuenta el lenguaje internacional) para que mediante una cartografía geomorfológica realizada mediante SIG e información temática de los eventos en el volcanismo sedimentario, se pudiera establecer una correlación con las amenazas que se pueden presentar, con el fin de facilitar los distintos ejercicios de ordenamiento del territorio, los planes de manejo y reducción de riesgos y la toma de medidas necesarias para mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Para el desarrollo de los objetivos planteados inicialmente se ajustaron algunos detalles. Debido a que las medidas implementadas por el Gobierno por la situación del COVID-19 fueron flexibilizadas se pudo realizar una visita de campo lo cual permitió verificar la caracterización de los rasgos geomorfológicos. Así mismo gracias al aporte por parte de la Corporación Autónoma regional de los Valles del Sinú y del San Jorge de imágenes captadas por dron del volcán San Diego se logró el óptimo desarrollo de los objetivos.

# 2. OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Caracterizar a escala detallada (1:500) los rasgos geomorfológicos del sector suroriental del volcán San Diego, Canalete, como insumo para la identificación de las amenazas que como determinante ambiental permitan ordenar el territorio.

## OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar los rasgos geomorfológicos como filtraciones, depósitos presentes en el sector suroriental del volcán San Diego, Canalete.
- Elaborar la cartografía geomorfológica del sector suroriental del volcán San Diego, Canalete.
- Correlacionar los rasgos geomorfológicos con las amenazas que pueden presentarse en el volcán sedimentario San Diego

# 3. REVISION BIBLIOGRAFICA

## 3.1.MARCO CONCEPTUAL

### 3.1.1. Volcán de lodo

Los volcanes de lodo son estructuras geológicas que se derivan de la infiltración de materiales arcillosos a la superficie terrestre o del mar. En ellos, grandes cantidades de agua, gas y materiales arcillosos se combinan y por diferencias de presión salen expulsados hacia la superficie terrestre a través de las grietas o fracturas (Dimitrov M., 2002) que existen en sitios donde se identifica cuñas de acreción y en donde las principales fuerzas tectónicas son de compresión (Chen, S.C., Hsu, S.k., et al., 2014).

### 3.1.2. Diapiro

En orden a identificar la diferencia entre diapiro de lodo y volcán de lodo resulta prudente desarrollar esos conceptos así: un diapiro de lodo es una estructura intrusiva que se caracteriza por el ascenso lento de sedimentos ricos en arcilla y un volcán de lodo, generalmente se encuentra, encima del diapiro y se forma como resultado de la migración de fluido directamente a lo largo del cuerpo del diapiro o a través de fallas que conectan al diapiro (Milkov, 2000; Kopf, 2002).

### 3.1.3. Cartografía geomorfológica

La cartografía geomorfológica busca registrar información información de las formas del terreno, los materiales que la constituyen y los procesos que la afectan, de manera que esta pueda permitir la reconstrucción de la historia de la zona de estudio. SGC ha adaptadado la metodología descrita "Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia" la cual propone adoptar el sistema de clasificación morfogenética (particularmente la metodología ITC) con la cual se puede definir la evolución geomofologica del área a estudiar dependiendo de la escala de trabajo. (Carvajal, 2012). Se propone y adapta una serie de rasgos que resultan en una clasificación que va desde estructuras de mayor tamaño a estructuras de menor tamaño asi:




Figura 1. Esquema de jerarquización geomorfológica. Fuente: (Carvajal 2012)

**A) Región:** Carvajal (2012) establece que una región gemorfológica es la agrupación de geoformas relacionadas genética y geográficamente, definidas por los ambientes morfogenéticos y geológicos afectados por procesos geomórficos parecidos; los ambientes geomorfogenéticos aluden a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas en las cuales se generaron las geoformas

**B) Unidad:** Se define como una geoforma individual genéticamente homogénea, generada por un proceso geomórfico construccional o

destruccional típico de un dado ambiente morfogénico y como unidad geomorfológica básica cartografiable. (SGC 2012).

**C) Subunidad:** Las subunidades al ser una subdivisión de la unidad geomorfológica, se clasifican de acuerdo con los contrastes morfológicos y morfométricos, que relacionan el tipo de material o la disposición de éstos con la correspondiente topografía del terreno (Carvajal, 2012)

**D) Componente**: 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).

# 4. ESTADO DEL ARTE

## 4.1. ANTECEDENTES

A nivel global, se han realizado varios estudios con relación al comportamiento del volcanismo sedimentario. El término 'sistema de volcán de lodo' fue definido formalmente por Stewart y Davies (2006) quienes lo describieron como un conjunto de estructuras asociadas con un edificio de construcción (volcán de lodo) y un complejo alimentador que conecta el volcán con su unidad estratigráfica de origen y cualquier otra fuente más profunda.

La forma del volcán de lodo "clásico" es similar a un volcán ígneo compuesto, es decir, un edificio cónico con un cráter en la cumbre (Judd y Hovland 2007). La morfología del edificio depende en gran medida de la viscosidad, la densidad, el tamaño de grano de los fluidos erupcionados al igual que su volumen y la frecuencia de las erupciones (Kopf 2002; Judd y Hovland 2007). Existen varios esquemas de clasificación para las distintas morfologías de los edificios y para los diferentes tipos eruptivos. El más simple definido por Kopf (2002), divide los edificios en dos, 'cúpulas de barro' que consisten en un edificio más o menos cónico con un cráter o caldera en la cima, y filtraciones más pequeños como grifos y salsas en sus costados. Los tipos de filtraciones más comunes incluyen a los grifos con una composición 30-90% lodo y 30% fluidos; las salsas con una composición 30% lodo y 70-100% fluidos; los tubos de brecha con una composición 30-90% lodo y y 30% fluidos; los tapones de lodos

Con una composición 90-100% lodo; y las piscinas con una composición 100% agua (Hovland et al. 1997; Planke et al. 2003; Roberts 2011).

De acuerdo con Mazzini y Etiope (2017), la morfología de los VL, su distribución, tipología y geoquímica variable en los sitios de infiltración, brindan información sobre el mecanismo de erupción, las amenazas y el sistema de conducción subterránea. De acuerdo con Mazzini y Etiope (2017), dentro de las geoformas encontradas en Azerbaiyán se encuentran:

1. Grifos: Los grifos son rasgos positivos de forma cónica. Aquí, el gas, el agua, el petróleo y el lodo se expulsan continuamente con densidad y volumen variables. Se podrían identificar tres tipos diferentes de grifos, dependiendo de las cantidades de: agua, gas, sedimento / brecha de lodo expulsado, denominados salpicaduras, burbujeadores y grifos clásticos.

2. Piscinas: Son estructuras sub-circulares sin o con poca elevación que suelen distribuirse a los pies de los grifos, su diámetro varía entre unos centímetros hasta alrededor de un metro, su profundidad es poca. En estos sitios se produce una liberación continua de gas y agua acompañada con una pequeña cantidad de grano fino.

3. Salsas: 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.

A nivel local, el SGC (2017) ha realizado estudios de amenazas por VL en el volcán San Diego, generando información relacionada con el tipo de “bocas” (filtraciones) y los antecedentes relacionados con las amenazas del volcán, además, realizó un estudio posterior a un evento eruptivo ocurrido el 5 de diciembre de 2017 en el volcán San Diego.

Este estudio fue realizado con base a información preexistente y una visita de campo realizada por dicha entidad con el fin de proporcionar información técnica básica para la toma de decisiones. En cuanto a la clasificación según el tipo de filtraciones, SGC se basó en lo propuesto por Higgins y Saunders (1974), los cuales establecen que las bocas o manaderos de lodo de este tipo de "volcán", se clasifican de acuerdo, tanto a la forma de estos, como a la pendiente de los flancos de los conos formados así: Tipo A (Cono con pendiente > 20º), Tipo B (Cono con pendiente de 5 - 20º), Tipo C (Cono con pendiente de 5 - 20º), Tipo C (Cono con pendiente <5º), Tipo D (Formas de caldera - Cráter de varios m de diámetro), Tipo O (Huecos o cráteres de pocos cm de diámetro). Durante la visita técnica y con el apoyo de información y fotos obtenidas con drone por la CVS (2017), se han podido identificar 320 bocas, predominantemente del tipo A, B y C en formas de cono con diámetros entre 5 y 8 m y con alturas de 1 – 5 m (Carvajal 2018).

Roberts et al. (2011), aplicaron el uso de sensores remotos para la identificación de las geoformas y las estructuras tectónicas en un complejo de volcanes de lodo en Azerbaiyán, y en el volcán de lodo de Lusi, Java Oriental; los análisis de teledetección se realizaron con el software ArcGis, incorporando imágenes aéreas y satelitales topográficas y bidimensionales 2-D (resolución de 0,5-6 m; imágenes IKONOS y CRISP), así como también con el software Google Earth. Las geoformas encontradas fueron caracterizadas asi:

Grifos: Conos de brechas de barro con charcos burbujeantes de barro en su cráter.

Salsas: 'Conos' poco profundos de brechas de barro con una gran piscina de barro acuoso en la cumbre y varios centros burbujeantes

Piscinas: Pequeños respiraderos que se agrupan alrededor de grifos y salsas que solo hacen erupción de agua

En México se llevó a cabo una caracterización geomorfológica en el complejo de volcanes Nevado de Toluca y San Antonio, el mapeo geomorfológico en esta zona permitió identificar unidades geomorfológicas como domos, laderas, cimas, valles, entre otros. (Espinoza et al. 2013). A escala nacional, también se han realizado estudios en los cuales se ha aplicado el uso de sensores remotos con el fin de identificar rasgos geomorfológicos y esfuerzos para estandarizar la elaboración de cartografía geomorfológica. En 2018, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) elaboró una guía metodológica para la interpretación de materiales geológicos a partir del uso de sensores remotos para la cartografía geomorfológica, en la cual se establecen como criterios de interpretación los factores pictóricos, el patrón de drenaje y los factores geomorfológicos (IGAC 2018).

En el marco de las geoamenazas, en la región suroccidental del Caribe Colombiano, se han presentado erupciones violentas acompañadas de llamas. Carvajal y Carrillo (2018) reportaron la pérdida de varios animales y el sepultamiento de una casa en octubre de 1976, como consecuencia de una erupción explosiva por las “bocas” del volcán San Diego en el departamento de Córdoba. En un área cercana al mismo volcán el 9 de marzo de 1992 se presentó otra erupción violenta de lodo y gas que dañó pastizales en un diámetro cercano a los 600 m causando quemaduras de segundo grado en una persona del lugar (Vega y Carvajal 1992), durante la erupción se generaron incendios que se extendieron 300 m al sureste de la zona de emisión; Carvajal (2001) también llegó a realizar aportes acerca de la amenaza por volcanismo de lodo en la Lorenza y determina que la amenaza en

general se asocia a la emisión de lodos y que su viscosidad depende del contenido de agua y gases (INGEOMINAS 2001).

El 5 de diciembre de 2017 se presentó en la hacienda Casetabla, la erupción del volcán de lodo San Diego- La Lorenza. Acorde con los testimonios de los habitantes del lugar y publicados por el periódico La Razón (2017), se levantó una columna de lodo de aproximadamente 10 m de altura, acumulando lodo entre 70 – 100 m alrededor del centro de emisión principal (Carvajal 2018). Durante el evento fueron extruidos cerca de 3.000 $m^3$ de lodo, en un área de 5800 $m^2$, generando un flujo en forma de meseta piramidal en promedio de 1.5 m de altura, el cual se extendió 68 m a partir del centro de emisión. En la erupción de lodo del 5 de diciembre de 2017 no se presentaron incendios, sin embargo, es característico de esta región la gran explosividad de los edificios volcánicos, lo cual se da tanto por la composición de los gases predominantemente de metano y el CO2, como por la composición de las arcillas con predominio de tipo expansivo que temporalmente pueden constituirse en sellos de los ductos de lodo. El registro histórico de este mismo volcán, indica que, durante la erupción de 1992 se generó fuego y se incendió el sector SW del volcán (Carvajal y Carrillo 2018).

## 5. MATERIALES Y METODOS

### 5.1.TIPO DE ESTUDIO

Esta investigación es de tipo descriptivo porque se analizan las geoformas encontradas en el volcán de lodo San Diego sector Suroriental del municipio de Canalete, estudiando las características morfológicas y los materiales que expulsan a la superficie y la relación existente entre dichas características de las groformasy sus amenazas.

### 5.2. MATERIALES

- Fotografías aéreas
- Flexómetro
- GPS
- Lápices
- Hojas
- Software ArcGis 10.8
- Software Adobe Photoshop 2021

### 5.3. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio de esta investigación se sitúa en el sector suroriental del volcán de lodo San Diego. Este volcán se ubica en el corregimiento La Lorenza, localizado a 5.7 km al SE del casco urbano del municipio de Canalete en el departamento de Córdoba (Figura 2)

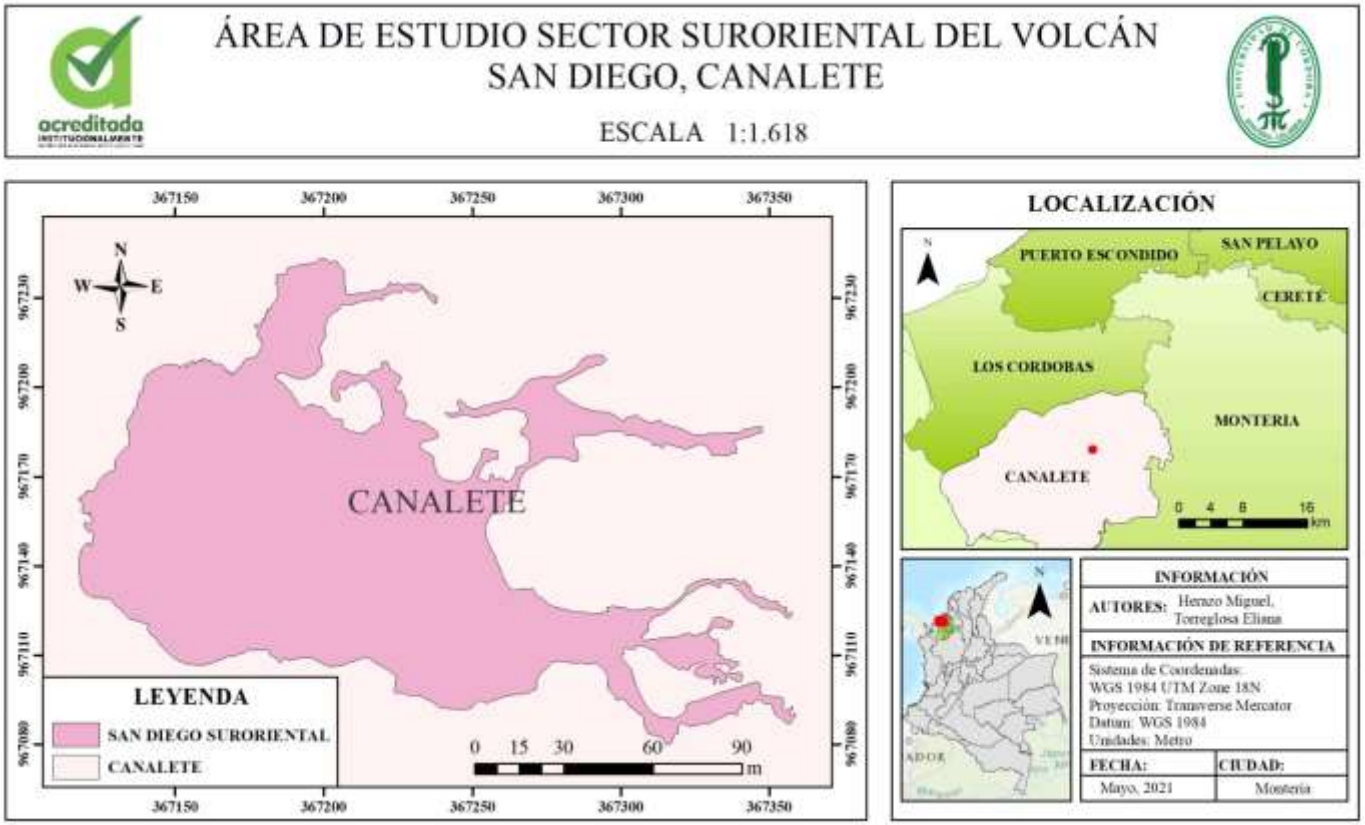



Figura 2. Mapa del sector Suroriental volcán San Diego. Fuente: Propia.

La realización de esta investigación hace parte de un proyecto mayor que tiene como objetivo generar la cartografía geomorfológica detallada del volcán San Diego como base del conocimiento de las amenazas por volcanismo sedimentario, mediante la identificación de las geoformas y materiales emitidos de conformidad con los referentes internacionales actualizados en la temática.

## 5.4.METODOLOGIA

Para el desarrollo del proyecto, se establecieron tres fases metodológicas conforme a cada objetivo específico propuesto previamente:

### FASE 1: CARACTERIZACION DE RASGOS GEOMORFOLOGICO

La fase 1 se desarrolló en una etapa:

**Cartografía preliminar:**

En la fase de propuesta se contempló alcanzar los objetivos mediante la utilización de imágenes satelitales, para el caso se tuvieron en cuenta imágenes WV3 (figura 3) y algunas otras observadas a través del visor Planet Explorer (figura 4). Sin embargo, el nivel de detalle que queríamos lograr representar en la caracterización y mapeo geomorfologico requería de imágenes de mejor resolución y menor porcentaje de nubosidad, por lo cual se decidió implementar una metodología que incluyera el uso de imágenes captadas por drones (VANT) que resultaron tener las características ideales para el proyecto.



Figura 3. Imagen Worldview 3, volcan de lodo San Diego



Figura 4. Imagen Planet Explore, volcán de lodo San Diego

Para la elaboración de la cartografía preliminar se hizo uso de imágenes captadas mediante drones en el año 2017 por la CVS. Fueron seleccionadas las imágenes que abarcaban la zona suroriental del volcán. Estas imágenes fueron compiladas en un mosaico mediante la herramienta Adobe Photoshop 2021 con el fin de obtener una sola imagen que comprendiera el área de estudio (imagen 5). La imagen obtenida fue geo-referenciada mediante el sofware ArcMap 10.8, posteriormente se procedió a delimitar los rasgos geomorfológicos encontrados mediante polígonos en el mismo programa.

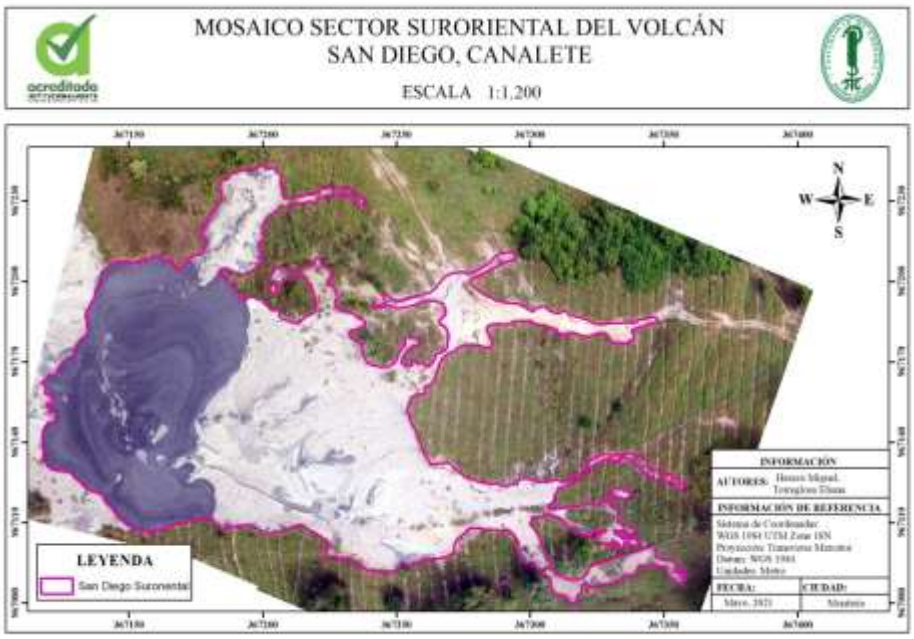



Figura 5Mosaico de imágenes captadas mediante drones. Volcán de lodo San Diego sector suroriental

Para la interpretación de los rasgos geomorfológicos en la imagen se tuvieron presente las clasificaciones y definiciones establecidas por Mazzini y Etiope (2017) y Roberts (2011), para el caso de aquellas que no coincidían con las particularidades de los rasgos propuestos por estos autores, se asignaron nombres en conformidad a las características de estas, proponiendo así un anexo en la clasificación. Quedando la clasificación de la siguiente manera:

- Grifos: Se clasificaron como grifos aquellas filtraciones que presentaron rasgos positivos y forma cónica. Estas filtraciones fueron subclasificadas en cuatro: salpicaduras, aquellas donde se evidencia un cráter pequeño y la presencia de lodo era casi nula; burbujueadores, aquellas donde se evidencian cráter de mayor tamaño que las salpicaduduras y con presencia de lodo muy notoria; clásticos, aquellas donde se observa cráter de mayor tamaño que las salpicaduras y que visualmente dan la sensación de profundidad ya que en estos se puede apreciar un material más denso que el emitido por los burbujeadores; y por último, extintos, los cuales se identificaron por la ausencia de cráter y actividad reciente.
- Salsas: Se clasificaron como salsas aquellas filtraciones poco profundas, sub-circulares y de poca elevación las cuales presentaban una gran cantidad de lodo a su alrededor.
- Piscinas: Se clasificaron como piscinas aquellas filtraciones que se agrupan alrededor de los grifos, estas son sub-circulares con una elevación nula y no presentan lodo a su alrededor, dentro de la filtración se observaron materiales menos densos comparados con las salsas.
- Colada: Si bien es cierto que las coladas no se encuentran dentro las clasificaciones de los autores en los cuales se basa esta investigación, se consideró que al ser estas elementos de gran relevancia debían ser incluidas como rasgos geomorfológicos dentro de la clasificación, considerándose así como colada a aquel material expulsado por las filtraciones y que cubre gran cantidad del terreno.

**FASE II: ELABORACION DE LA CARTOGRAFIA GEOMORFOLOGICA.**

La fase 2 de la investigación se desarrolló en tres etapas:

- **Verificación en campo:** Una vez caracterizadas y clasificadas las geoformas encontradas mediante el análisis del mosaico de acuerdo con

lo estipulado por Mazzini y Etiope (2017) y Roberts (2011) y diseñado los polígonos de los rasgos geomorfológicos mediante el programa ArcMap 10.8, se obtuvo una cartografía preliminar no supervisada. Posteriormente, se realizó una visita de campo con el fin de verificar los datos obtenidos en la cartografía preliminar y confirmar la clasificación de cada una de las filtraciones anteriormente dadas. En esta visita de campo se seleccionaron algunas geoformas representativas (teniendo en cuenta el tamaño) de cada tipo de grifo encontrado y se procedió a medir su altura haciendo uso de una cinta métrica y calcular la longitud de los flancos a través de cálculos trigonométricos.

- **Cartografía geomorfológica definitiva:** Con la información obtenida en la visita en campo, se procedió a la verificación y comparación con la información estipulada en la cartografía preliminar, luego de comparada y analizada la información se procedió a realizar la cartografía geomorfológica definitiva o supervisada.
- **Adaptación de nomenclatura:** los rasgos geomorfológicos encontrados fueron clasificados en jerarquías según lo estipulado en la PROPUESTA DE ESTANDARIZACION DE LA CARTOGRAFIA GEOMORFOLOGICA EN COLOMBIA (Carvajal 2012). Además, este documento estipula una guía para recrear la nomenclatura que se debe asignar a los rasgos geomorfológicos al momento de realizar una cartografía geomorfológica en Colombia. Para el diseño, se tuvieron en cuenta los colores establecidos en la propuesta para el volcanismo sedimentario.

  De acuerdo con lo establecido en la propuesta de estandarización y las características observadas en campo, se hizo la clasificación de la siguiente manera:

- *Geomorfoestructura:* Sistema Orogénico costero.
- *Provincia*: Cinturón montañoso del Sinú.
- *Región*: En la propuesta de estandarización se establecen los ambientes morfogenéticos en Colombia, sin embargo, se concluyó que las

características de la zona de estudio no corresponden a ninguno de estos ambientes, por lo cual, en este trabajo se propone que se debe anexar un ambiente morfogenético relacionado con las características del volcanismo sedimentario, es decir, el ***ambiente de volcanismo sedimentario***. Cabe resaltar que si bien es cierto que en la propuesta se habla de un ambiente volcánico, este está directamente relacionado con los volcanes magmáticos cuyos materiales son completamente diferentes a los materiales característicos de los volcanes de lodo.

- *Unidad*: Volcán de lodo San Diego

**FASE III: CORRELACION DE LA INFORMACION OBTENIDA CON EL TIPO DE AMENAZA**

Luego obtener la cartografía geomorfológica, se realizó una correlación entre los diferentes rasgos geomorfológicos y el tipo de amenaza presente. Organizando una matriz de correlación donde cada geoforma, según sus características, se relaciona con un tipo de amenaza por volcanismo sedimentario.

Las amenazas identificadas fueron esencialmente: incendios, expulsión de flujo de lodo y expulsión violenta de brecha de lodo. Así, las geoformas ,. se correlacionaron con su amenaza de acuerdo al tipo de material expulsado; por un lado, las filtraciones que presentaron materiales más densos se relacionaron con amenazas por expulsión de flujo y brecha de lodo y, por otro lado, las filtraciones que se caracterizaron por la expulsión de gases se relacionaron con amenazas por incendio.

# 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

## 6.1. CARACTERIZACION DE LOS RASGOS GEOMORFOLOGICOS.

San Diego es un volcán de lodo que presenta una caracterización geomorfológica muy particular y no debe entenderse solo como un cono volcánico, sino más bien como una unidad compuesta por una gran cantidad de estructuras conocidas como filtraciones que a su vez, generan geoformas en superficie que en esta investigación serán distinguidas como depósitos de volcanismo sedimentario. Se identificaron los rasgos geomorfológicos del sector suroriental del volcán san Diego observados en fotografía tomada por dron y en la visita en campo las cuales fueron clasificadas así:




Figura 6. Clasificación de geoformas encontradas. Fuente: Propia.

### 6.1.1. FILTRACIONES

Las filtraciones hacen referencia a las estructuras por medio de las cuales es transportado o expulsado el material desde el interior del volcán hacia la superficie. Se presenta un inventario de las filtraciones encontradas en el volcán San Diego, basado en lo propuesto por Mazzini y Etiope (2017) y Roberts (2011) quienes tiene en cuenta características como la forma en superficie y el material expulsado para establecer las clasificaciones; cabe resaltar que en esta investigación, se proponen y asignan nombres a aquellas geoformas que no coinciden con ningunas de las clasificaciones propuestas por estos autores.

#### 6.1.1.1.GRIFOS.

Se encontraron en total 70 grifos en la zona de estudio distribuidos de la siguiente manera.

##### 6.1.1.1.1. GRIFOS SALPICADURAS.

A lo largo de la zona se identificaron 10 grifos salpicaduras los cuales se caracterizaron por poseer las medidas de cráter y base señaladas en la tabla 1.

**Tabla 1. Características de grifos salpicaduras**

| Nomenclatura | Áreas($m^2$) | |
|---|---|---|
| | **Cráter** | **Base** |
| VsSDGs1 | 0,03 | 3,76 |
| VsSDGs2 | 0,01 | 2,20 |
| VsSDGs3 | 0,13 | 1,67 |
| VsSDGs4 | 0,02 | 5,33 |
| VsSDGs5 | 0,01 | 1,77 |
| VsSDGs6 | 0,008 | 1,57 |
| VsSDGs7 | 0,007 | 0,42 |
| VsSDGs8 | 0,01 | 2,34 |
| VsSDGs9 | 0,09 | 1,51 |
| VsSDGs10 | 0,06 | 2,66 |

Los grifos salpicadura se caracterizaron por tener cráteres pequeños. El área de los cráteres de este tipo de grifos osciló entre 0,007$m^2$ y 0,13$m^2$. En la visita en campo se hicieron mediciones de altura y longitud de los flancos de las salpicaduras, las cuales oscilaron entre 48 cm - 123 cm y 68,5 cm – 159 cm respectivamente.




Figura 7. Grifos salpicaduras. (A) Cráter (B) Forma cónica. Fuente: Propia.

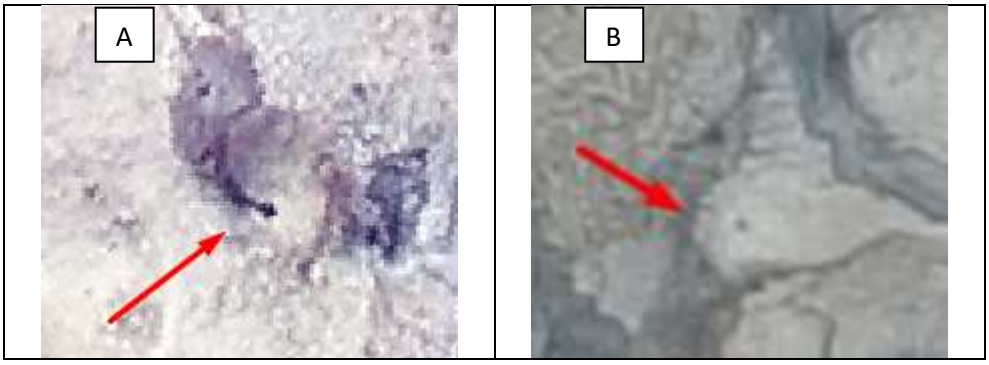



Figura 8. Grifos observados desde el mosaico de imágenes. A. Grifo salpicadura. B. grifo salpicadura

De acuerdo a lo estipulado por Mazzini y Etiope (2017) acerca de los grifos salpicaduras presentes en Azerbaiyán, estos se caracterizan por su cráter pequeño, la emisión a la superficie gases acompañados en algunos casos por pequeñas cantidades de lodo y por no contar con presencia de agua, estas características fueron corroboradas en las salpicaduras del volcán San Diego puesto que no se evidenció expulsión de material

continuo como flujo o brecha de lodo mediante su cráter, el cual daba la impresión de estar vacío (Figura 4 A) lo que confirma la idea de estos autores que las salpicaduras expulsan principalmente y en gran medida gases como el metano.

Martínez et al. (2020), realizaron la caracterización de las geoformas de emisión de lodo en el volcán sedimentario Totumo, en la cual clasificaron como grifo salpicadura a aquella geoforma donde se observa una importante actividad de lodo fluido, un cráter estrecho y un edificio de paredes escarpadas cubiertas por costras de lodo seco, sin embargo, los grifos salpicaduras hallados en el volcán San Diego no evidencian expulsión de lodo continuo, más bien, el lodo generalmente fue encontrado en los flancos de estos grifos, el cual, es depositado en estas zonas cuando es expulsado en pequeñas cantidades y de forma periódica siendo impulsado por el gas (Figura 4 B)

#### 6.1.1.1.2. GRIFOS BURBUJEADORES.

Se encontraron 31 grifos burbujeadores en la zona de estudio; los cuales se caracterizaron por poseer las medidas de cráter, base y colada inventariados en el anexo1 y algunos se relacionaron en la tabla2.

Tabla 2. Características de los grifos burbujeadores.

| **Nomenclatura** | **Áreas($m^2$)** | | |
|---|---|---|---|
| | **Cráter** | **Base** | **Colada** |
| VsSDGb1 | 1,45 | 6,61 | 9,48 |
| VsSDGb2 | 0,005 | 1,04 | 5,81 |
| VsSDGb3 | 0,007 | 0,82 | 5,39 |
| VsSDGb4 | 0,36 | 2,43 | 3,18 |
| VsSDGb5 | 0,074 | 6,63 | 16,95 |
| VsSDGb6 | 0,13 | 0,77 | 8,28 |
| VsSDGb7 | 0,69 | 3,59 | 562,04 |
| VsSDGb8 | 0,96 | 10,39 | 6,31 |
| VsSDGb9 | 1,79 | 6,98 | 3,37 |
| VsSDGb10 | 0,62 | 4,53 | 8,01 |
| VsSDGb11 | 3,78 | 9,23 | 14,46 |

Los grifos burbujeadores se caracterizaron por tener cráteres de mayor tamaño que los grifos salpicaduras. El área de los cráteres de este tipo de grifos osciló entre 0,001$m^2$y 3,78m$^2$. En la visita en campo se hicieron mediciones de altura y longitud de los flancos de los burbujeadores, las alturas oscilaron entre 30 cm - 145 cm y la longitud de los flancos oscilaron entre 50.80 cm y 194 cm.

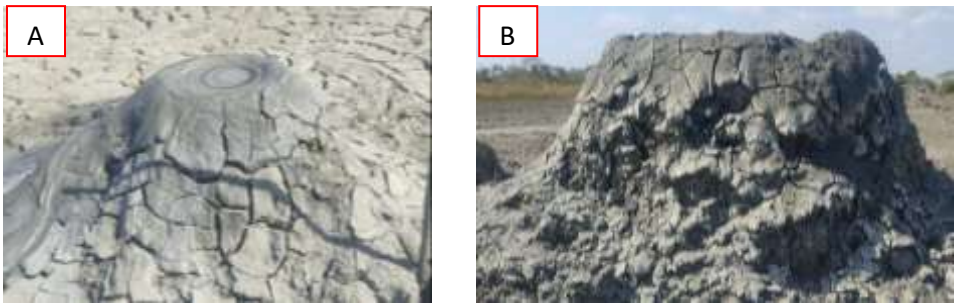



Figura 9. Grifos burbujeadores. (A) Cráter (B) Forma. Fuente: Propia

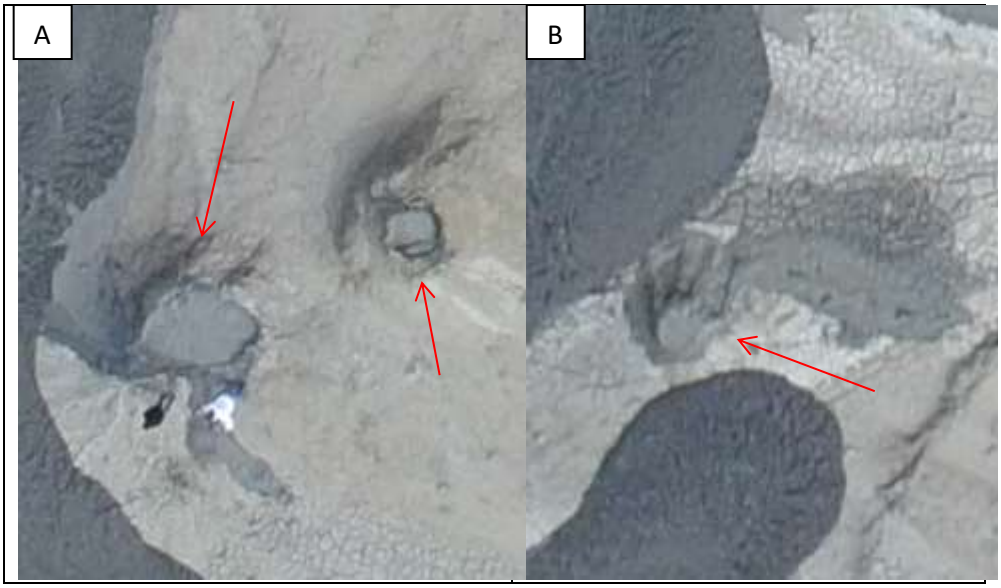



Figura 10. Grifos observados desde el mosaico de imágenes. A. Grifo burbujeador. B. grifo burbujeador

De acuerdo a lo estipulado por Mazzini y Etiope (2017) acerca de los grifos burbujeadores presentes en Azerbaiyán, estos se caracterizan por su cráter grande de hasta un metro de diámetro en los cuales se presencia

burbujas de gas con pulsaciones y una periódica expulsión de flujo de lodo a la superficie cuando el cráter se llena, todas estas características fueron corroboradas en los burbujeadores del volcán San Diego puesto que se evidencio una periódica emisión de flujos de lodo en este tipo de grifos cada vez que el cráter se llenaba, dichas emisiones llegaron a tener un área de 562,04 $m^2$. Asi mismo se confirmó lo estipulado por los autores debido a que el contenido de agua es en menor proporción comparado con el lodo y gas presente en la geoforma.

#### 6.1.1.1.3. GRIFOS CLASTICOS.

Se identificaron 9 grifos clásticos, los cuales se caracterizaron por poseer las medidas de cráter, base y colada señaladas en la tabla 3.

Tabla 3. Características de grifos clásticos.

| **Nomenclatura** | **Áreas($m^2$)** | | |
|---|---|---|---|
| | **Cráter** | **Base** | **Colada** |
| VsSDGc1 | 0,05 | 1,29 | 13,62 |
| VsSDGc2 | 1,40 | 4,96 | 7,04 |
| VsSDGc3 | 0,85 | 2,98 | 51,63 |
| VsSDGc4 | 0,35 | 1,61 | 18,31 |
| VsSDGc5 | 1,07 | 4,17 | NO |
| VsSDGc6 | 0,14 | 1,29 | 0,97 |
| VsSDGc7 | 0,99 | 10,54 | 2,54 |
| VsSDGc8 | 0,21 | 0,86 | NO |
| VsSDGc9 | 0,28 | 0,99 | NO |

Los grifos clásticos se caracterizaron por tener cráteres de mayor tamaño que los grifos salpicaduras y muy parecidos a los burbujeadores. El área de los cráteres de este tipo de grifos osciló entre 0,86$m^2$ y 1,40$m^2$. En la visita en campo se hicieron mediciones de altura y longitud de los flancos de los burbujeadores de menor y mayor altura. Las alturas oscilaron entre

40 cm - 123 cm y las longitudes de los flancos oscilaron entre 78 cm y 166 cm.



Figura 11. Grifo clástico. Fuente: Propia

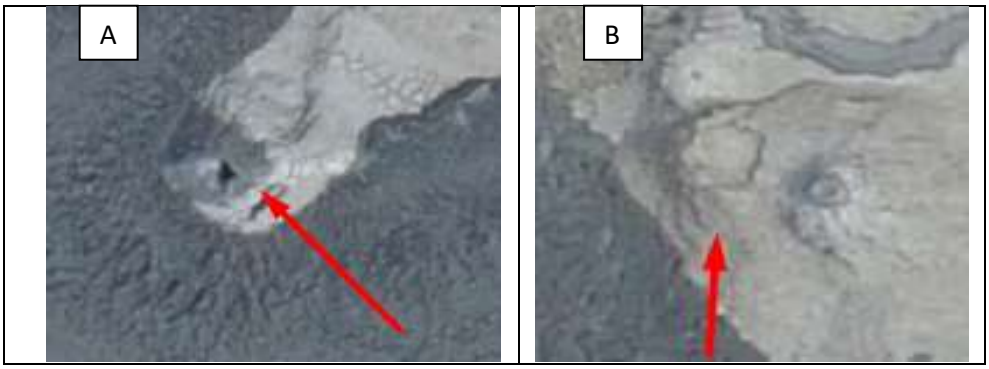



Figura 12. Grifos observados desde el mosaico de imágenes. A. grifo clástico. B. grifo clástico

De acuerdo a lo estipulado por Mazzini y Etiope (2017) acerca de los grifos clásticos presentes en Azerbaiyán, estos se caracterizan por su cráter grande en los cuales se encuentran sedimentos de alta densidad que al ser expulsados contienen una serie de bloques, estas características fueron corroboradas en los clásticos del volcán San Diego puesto que presentaron la particularidad de expulsar a la superficie brechas de lodo, la cual es más densa que el flujo de lodo que expulsan los burbujeadores; la brecha, además de lodo, se compone de materiales clásticos de diferentes tamaños, debido a su viscosidad se queda retenida en los flancos de los grifos y no cubre mucha área del volcán en comparación

con los flujos de lodos. El contenido de agua y de gas expulsados en este tipo de grifos es muy poco confirmando lo estipulado por los autores.

Martínez et al. (2020), en el volcán sedimentario Totumo encontraron una geoforma que emite lodo fluido y gas, y en la base observaron clastos de gravas que constituyen la brecha de lodo, la cual clasificaron como un grifo clástico, en esta la expulsión de gas es notoria, puesto que se evidencia un burbujeo periódico dentro de su cráter, dicha característica no fue encontrada en los clásticos del volcán San Diego puesto que dentro de su cráter se encontró un material muy denso el cual no presentaba un burbujeo constante, lo cual indica que en estos el contenido de gas que expulsa a la superficie es menor.

#### 6.1.1.1.4. GRIFOS EXTINTOS

Se identificaron 20 grifos extintos, los cuales se caracterizaron por poseer las medidas de cráter y base señaladas en la tabla 4.

Tabla 4. Características de grifos extintos.

| **Nomenclatura** | **Partes** | **Área($m^2$)** |
|---|---|---|
| VsSDGe1 | Base | 1,17 |
| VsSDGe2 | Base | 2,77 |
| VsSDGe3 | Base | 4,13 |
| VsSDGe4 | Base | 3,87 |
| VsSDGe5 | Base | 16,49 |
| VsSDGe6 | Base | 4,31 |
| VsSDGe7 | Base | 5,61 |
| VsSDGe8 | Base | 3,32 |
| VsSDGe9 | Base | 2,24 |
| VsSDGe10 | Base | 1,98 |
| VsSDGe11 | Base | 2,54 |
| VsSDGe12 | Base | 2,39 |
| VsSDGe13 | Base | 2,50 |
| VsSDGe14 | Base | 4 |
| VsSDGe15 | Base | 5,44 |
| VsSDGe16 | Base | 1,59 |
| VsSDGe17 | Base | 2,08 |
| VsSDGe18 | Base | 0,38 |
| VsSDGe19 | Base | 0,18 |

| | | |
|---|---|---|
| VsSDGe20 | Base | 1,82 |

Como se observa en la tabla 4 estas geoformas solo presentaron base, las cuales tuvieron medidas de área que oscilaron entre 16.49 $m^2$ y 0.17$m^2$. En la visita en campo se hicieron mediciones de altura y longitud de los flancos de los extintos, las alturas oscilaron entre 51 cm - 105 cm y la longitud de los flancos oscilaron entre 71 cm y 150 cm.

Este tipo de geoformas es llamado por algunos referentes como grifos dormidos o inactivos en los cuales se puede observar presencia de material, indicando que tuvo actividad recientemente y que puede volver a presentarlo, según Mazzini et al. (2011), la no presencia de cráteres puede deberse por las temporadas secas las cuales hacen que los fluidos se sequen por la alta tasa de evaporación, cementándose y haciendo que el cráter se cierre de manera temporal, en la visita en campo realizado al volcán San Diego en 2021 (temporada seca) este tipo de geoformas no presentaron cráteres ni presencia de actividad reciente (Figura (4A)) lo cual difiere de lo planteado anteriormente. En el año 2019 se realizó una visita al volcán (temporada de lluvias) y esta geoformas no presentaron cráteres ni presencia de actividad reciente (Figura (4B)). Así mismo Roberts (2011) define como estructura inactiva como aquellas rejillas de ventilación que ya no ventilan activamente fluidos, basándose en esta definición y debido a que este tipo de geoformas no concordaban con las características descritas por los autores mencionados anteriormente fueron clasificados como grifos extintos.




Figura 13. Grifo extinto. (A) En temporada seca (B) En temporada lluvia




Figura 14. Grifos observados desde el mosaico de imágenes. A. grifos extinto. B. grifo extinto.

### 6.1.1.2. CONGLOMERADOS DE GRIFOS.




Figura 15. Conglomerado de grifos. Fuente: Propia

En la imagen utilizada para el desarrollo de la investigación al igual que la visita en campo se encontraron estructuras que no estaban definidas por los autores. Como es el caso de algunas zonas donde se agrupaban geoformas del mismo tipo, a estas estructuras las denominamos conglomerados, esto fue encontrado en grifos como salsas. Se consideraron conglomerados de grifos a aquellas zonas donde se agrupaban 3 o más grifos (figura 8). En la zona de estudio se encontraron 4 conglomerados de grifos señalados en la tabla 5.

Tabla 5. Características de los conglomerados de grifos.

| **Nomenclatura** | **Descripción** |
|---|---|
| VsSDCg1 | No se pudo evidenciar los grifos que lo conformaban. |
| VsSDCg2 | Conglomerado de grifos donde se hallaron 8 grifos extintos y 2 grifos burbujeadores, se pueden observar algunas coladas disecadas provenientes de los burbujeadores |
| VsSDCg3 | Conglomerado de grifos donde se hallaron 2 burbujeadores, 1 clástico, 2 salpicadura, 2 extintos en los cuales no se pudo observar actividad reciente a salvo del grifo burbujeador que contaron con un pequeño flujo de lodo. |
| VsSDCg4 | Conglomerado de grifos donde se hallaron 4 burbujeadores. 1 salpicadura, 1 clástico en los cuales se puede evidenciar actividad reciente por los flujos de lodo presentes. |

#### 6.1.1.3. SALSAS.

Las salsas son estructuras de forma sub-circular que pueden alcanzar varios metros de profundidad en las cuales se produce la filtración de gas, agua y una cantidad considerable de lodo.

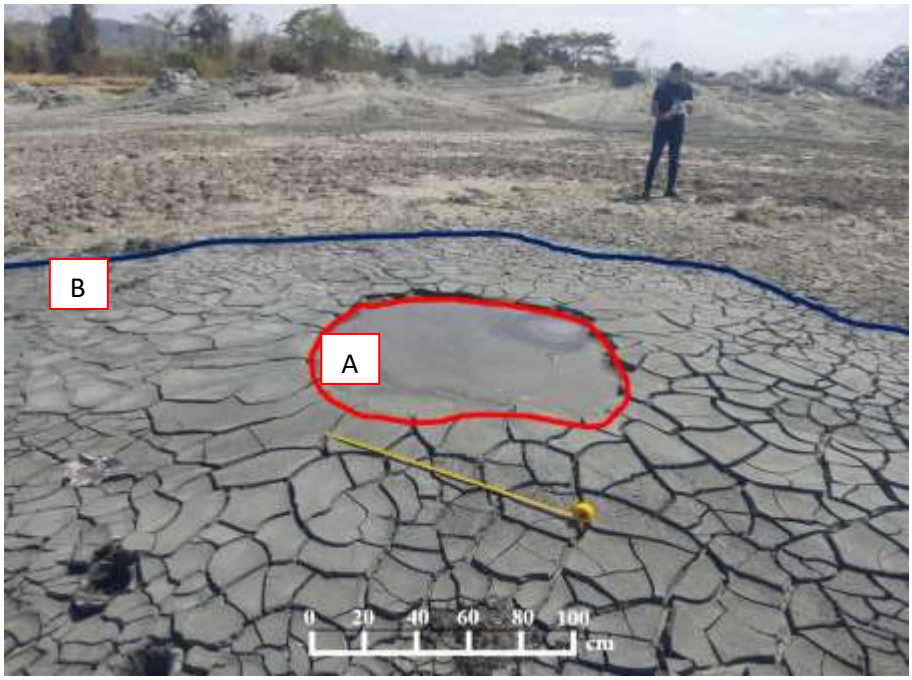



**Figura 16. Salsa. (A) Cráter polígono rojo (B) Colada polígono azul**

Fuente: Propia.



Figura 17. Salsas observadas desde mosaico de imágenes. A. Salsa. B. Salsa

Se identificaron 27 salsas, los cuales se caracterizaron por poseer las medidas de cráter y coladas señaladas en la tabla 6.

Tabla 6. Características de las salsas.

| # | Nomenclatura | Áreas (m²) | |
|---|---|---|---|
| | | Cráter(m²) | Colada (m²) |
| 1 | VsSDS1 | 0,030 | 3,63 |
| 2 | VsSDS2 | 0,22 | 61,01 |
| 3 | VsSDS3 | 0,001 | 1,38 |
| 4 | VsSDS4 | 0,04 | 3,68 |
| 5 | VsSDS5 | 0,01 | 3,86 |
| 6 | VsSDS6 | 0,01 | 1,76 |
| 7 | VsSDS7 | 0,02 | 1,41 |
| 8 | VsSDS8 | 0,17 | 1,51 |
| 9 | VsSDS9 | 0,03 | 1,68 |
| 10 | VsSDS10 | 0,08 | 3,50 |
| 11 | VsSDS11 | 0,02 | 1,70 |
| 12 | VsSDS12 | 0,15 | 3,40 |
| 13 | VsSDS13 | 0,07 | 11,20 |
| 14 | VsSDS14 | 0,97 | 3,67 |
| 15 | VsSDS15 | 0,10 | 0,41 |
| 16 | VsSDS16 | 0,02 | 1,41 |
| 17 | VsSDS17 | 0,003 | 2,15 |
| 18 | VsSDS18 | 0,02 | 8,62 |
| 19 | VsSDS19 | 0,03 | 19,94 |
| 20 | VsSDS20 | 0,002 | 1,59 |
| 21 | VsSDS21 | 0,02 | 1,03 |
| 22 | VsSDS22 | 0,01 | 0,51 |
| 23 | VsSDS23 | 0,008 | 1,73 |
| 24 | VsSDS24 | 0,008 | 0,47 |
| 25 | VsSDS25 | 0,08 | 0,43 |
| 26 | VsSDS26 | 0,07 | 0,71 |
| 27 | VsSDS27 | 0,007 | 3,60 |

Se pudo identificar que el tamaño de las áreas de los cráteres en su mayoría fueron muy pequeños puesto que todos oscilaran entre valores menores a $1m^2$. Las coladas tuvieron valores de áreas que oscilaron entre $0.4m^2$ y $61m^2$.

A nivel internacional, el término salsa ha sido definido por varios autores encontrándose que estos difieren en sus conceptos, Roberts (2011), considera las salsas como 'Conos' poco profundos de brechas de lodo con una gran piscina de lodo acuoso en la cumbre y varios centros burbujeantes; por su parte, Mazzini y Etiope (2017) consideran las salsas como “lagos salsas” y definen estos como sitios de filtración de gas y agua sub circulares que pueden alcanzar varias decenas de metros de diámetro y varios metros de profundidad. Mazzini y Etiope (2017) difieren de Roberts puesto que ellos consideran que en las salsas una pequeña cantidad de lodo se filtra mientras que para Roberts el material que más abunda en las salsas es el lodo, característica que concuerda con lo encontrado en las salsas del volcán San Diego puesto que emiten lodo en gran cantidad a la superficie y se evidencia un burbujeo constante en algunas de ellas debido a la actividad del gas presente en su interior. Dado que la cantidad de material que expulsan es grande, las coladas de lodo fluido generadas tienden a presentar áreas que ocupan extensiones considerables (hasta 61$m^2$).

Así mismo a una escala más regional Martínez et al. (2020), definieron que los lagos salsas encontrados en el volcán de lodo Totumo presentan cráteres con diámetros máximos a 0.2m, emisión de lodo fluido y gas igualmente encontraron que estas geoformas han emitido un material de mayor heterogeneidad litológica, denominado brecha de lodo, que contiene bloques de areniscas y clastos de gravas silíceas embebidos en una matriz de lodo, en el volcán San Diego no se encontró evidencia de expulsión de brecha de lodo en las salsas, solo de coladas de lodo.

#### 6.1.1.4.CONGLOMERADO DE SALSAS.

Un conglomerado de salsas hace referencia a una geoforma en donde confluyen 3 o más salsas y en la cual, los “cráteres” de estas se encuentran uno junto al otro a tal punto que a simple vista no se logra diferenciar una salsa de la otra; se podría inferir que en los

conglomerados los conductos de las salsas son diferentes sin embargo, están lo suficientemente cerca como para que en superficie sus cráteres logren coincidir. Además, algunos de estos conglomerados no se encuentran a ras de superficie sino que presentan alturas entre los 50 y 100 cm y flancos con una elevación promedio de 60°. Se encontraron 3 conglomerados de salsas con las áreas señalados en la tabla 7.

Tabla 7. Características de los conglomerados de salsas

| Conglomerado de salsas | | |
|---|---|---|
| # | **Nomenclatura** | **Área (m2)** |
| 1 | VsSDCs1 | 20,193051 |
| 2 | VsSDCs2 | 17,766954 |
| 3 | VsSDCs3 | 20,003033 |

Roberts (2011) define una geoforma que parece tener una definición similar, ella lo llama “tubos de salsa” y los define como grupos de salsas rodeadas de lodo húmedo que contiene clastos de roca rural, lo cual se asemeja un poco a la definición asignada a conglomerados de salsa en este trabajo, lo cual difiere en el contenido de clastos.

#### 6.1.1.5.PISCINAS

Se encontraron 13 piscinas con las características descritas en la tabla 8.

Tabla 8. Características de las piscinas.

| **Nomenclatura** | **Áreas ($m^2$)** |
|---|---|
| | **Cráter** |
| VsSDP1 | 5,74 |
| VsSDP2 | 0,40 |
| VsSDP3 | 0,19 |
| VsSDP4 | 0,43 |
| VsSDP5 | 0,32 |
| VsSDP6 | 0,25 |
| VsSDP7 | 0,21 |
| VsSDP8 | 0,17 |
| VsSDP9 | 0,13 |

| | |
|---|---|
| SvlP10 | 0,59 |
| VsSDP11 | 0,12 |
| VsSDP12 | 0,32 |
| VsSDP13 | 1,14 |

Para la identificación de estas geoformas se tuvieron en cuenta a aquellas que daban la sensación de ser charcos de agua y que se encontraban a ras de piso; al no presentar elevación el agua que es lo que generalmente emiten a la superficie se encuentra situada dentro de su cráter y no es usual ver lodo a los alrededores. Estas geoformas se caracterizaron por ser estructuras subcirculares sin elevación, su área oscilo 0,12 $m^2$ y 5,74 $m^2$. Roberts (2011), Mazzini y Etiope (2017) definen que las piscinas son estructuras con muy poca profundidad, en campo fueron medidas la profundidad de varias piscinas, esta medida no sobrepasaban los 2 metros.



Figura 18. Piscina. Fuente: Propia.



Figura 19. Pisicna observada desde mosaico de imágenes.

Fueron encontradas piscinas situadas al pie de los grifos y alejados de ellos, según Mazzini y Etiope (2017) la razón por la cual se sitúan piscinas al pie de los grifos es por el continuo crecimiento de estos, lo cual provoca pequeñas fracturas que se encuentran conectadas al conducto principal del grifo y por donde el agua se libera a la superficie, así mismo las piscinas que se sitúan alejadas presentaron la característica de tener mayor tamaño que las situadas cerca de grifos, esto puede ser que las cercanas a los grifos son fracturas provenientes de estos, mientras que las alejadas son geoformas independientes.

Así mismo a una escala más regional Martínez et al. (2020), encontraron una piscina en el volcán Totumo las cual tenía forma deprimida y estaba ubicada cerca al grifo, la cual emitía esencialmente gas y agua, en las piscinas encontradas en el volcán San Diego no se evidenció presencia de gas puesto que no fue observado burbujeo en ellas. Sin embargo Mazzini y Etiope (2017) y Roberts (2011) afirman que en estas geoformas hay presencia de gases.

### 6.1.2. DEPOSITOS DE VOLCANISMO SEDIMENTARIO.

Los depósitos consisten en las estructuras formadas en superficie cuando el material se acumula en las vecindades de las filtraciones. Los tipos de

depósitos encontrados se clasificaron de conformidad a su edad relativa y aspecto físico en: Coladas recientes y coladas antiguas.

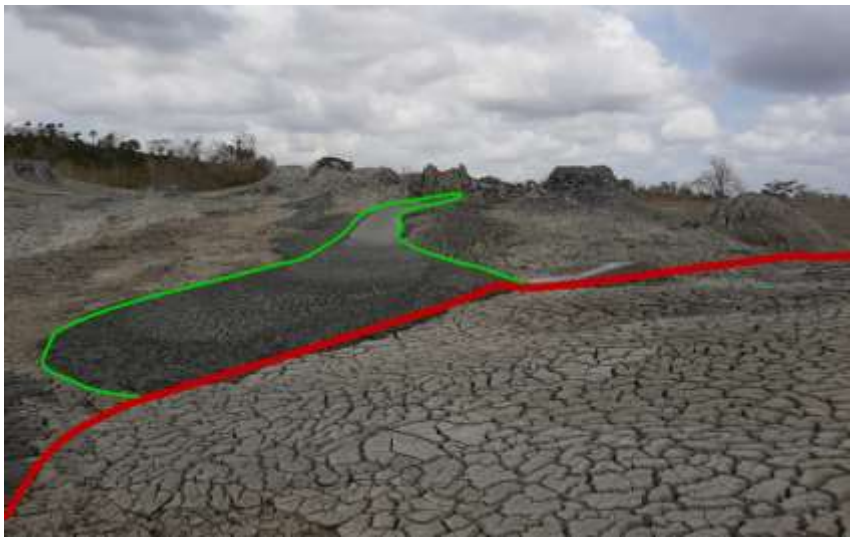


Figura 20. Coladas. En la imagen, el polígono verde refleja una colada reciente; el polígono rojo representa una colada antigua). Fuente: Propia.

#### 6.1.2.1.COLADAS ANTIGUAS

Se denominaron coladas antiguas a aquellos flujos de materiales que llevan mucho tiempo depositado en la superficie manifestando así la presencia de grietas, las cuales se forman principalmente por factores climáticos y el tipo de arcilla predominante en dichos flujos. Los procesos en el lodo se dan como en el suelo, en el cual, la incidencia de la luz solar sobre la superficie genera aumentos en la temperatura de este, provocando así una disminución en el contenido de humedad de los materiales; ahora bien, las cantidades de agua, materiales arcillosos y materiales clásticos no están distribuidos uniformemente o de forma proporcional en las coladas de lodo sino que se van generando zonas en las cuales es transportado el material acuoso y zonas de acumulación de material arcilloso y clástico, lo cual explica que cuando el porcentaje de humedad disminuye en algunas zonas se formen canales y en otras se observe acumulación de materiales arcillosos y clásticos secos y

compactos. El resultado finalmente son grietas de desecación que en el caso del volcán San Diego alcanzaron hasta 20 cm de diámetro y 70 cm de profundidad, así mismo presentan coloraciones grises claras como se puede observar en la figura 12.

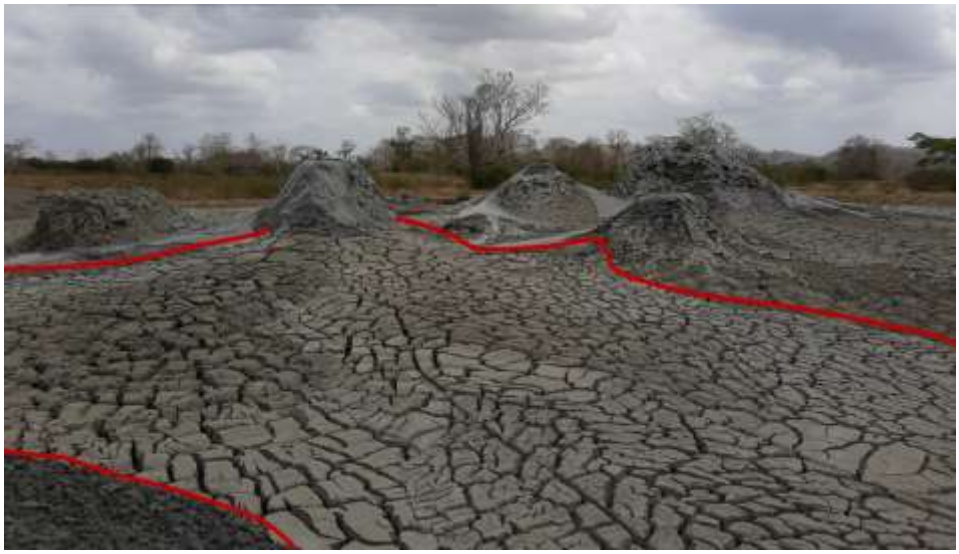


Figura 21. Colada antigua con grietas de desecación. Fuente: Propia

#### 6.1.2.2.COLADAS RECIENTES.

Las coladas recientes son flujos de material que ha sido depositado en un periodo de tiempo relativamente corto, es decir, son las geoformas generadas por la más reciente emisión de material. Se caracterizaron por presentar alto grado de viscosidad, ser húmedas y de coloración gris oscura. Estas coladas se encuentraron situadas por encima de las coladas antiguas y a diferencia de las coladas antiguas estas no presentaron grietas de desecación.



Figura 22. Colada reciente. Fuente: Propia

Teniendo en cuenta el material que componen a las coladas antiguas y recientes estas pueden estar compuestas por:

**A. Coladas de flujo de lodo**

Las coladas de flujo de lodo son generadas por el material emitido por geoformas como los grifos burbujeadores y salas. Estos flujos se caracterizan por su alta viscosidad, la ausencia de materiales clásticos y presencia de arenas finas.



Figura 23. Colada de flujo de lodo. Fuente: Propia.

En el volcán San Diego fueron encontradas 27 coladas de flujo de lodo provenientes de salsas (tabla 6) y 31 provenientes de grifos burbujedores, (tabla 2).

**B. COLADAS DE BRECHA DE LODO.**

Son depósitos formados por el material emitido principalmente por los grifos clásticos. Estos flujos se caracterizan por la presencia no solo de lodo sino además de clastos derivados de rocas sedimentarias como la arenisca, limolita y fragmentos de arcillolita, además se desplazan desde el cráter de los grifos hacia la base. Son flujos con áreas desde 1 hasta 50 $m^2$. En cuanto al material expulsado, se confirmó en campo lo establecido

por Carvajal (2018), el cual afirma que estos depósitos están constituidos de arenas arcillosas pardas amarillentas y por sectores, gravas de bloques angulares y redondeados de 5-10 cm de diámetro.

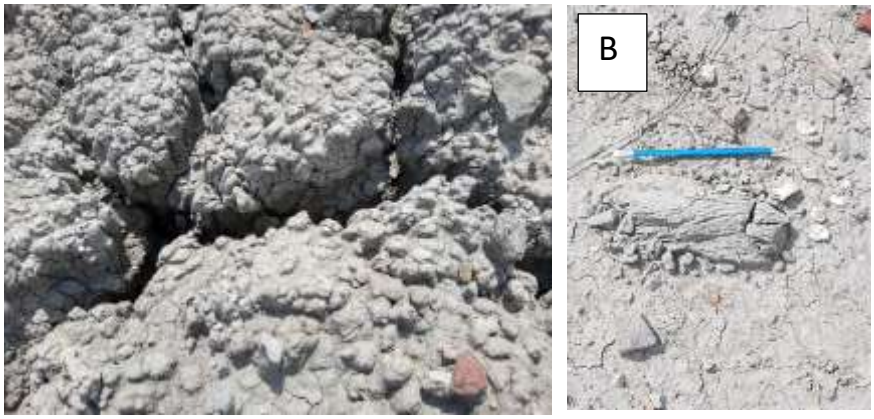



Figura 24. (A) Colada desecada de brecha de lodo. (B) Bloques producto de expulsión de brecha. Fuente: Propia.

En la zona de estudio se encontraron 7 coladas de brecha de lodo asociadas a grifos clásticos (tabla 3)

Así mismo Martínez et al. (2020), encontraron en el volcán Totumo brecha de lodo la cual estaba constituida por bloques de areniscas y clastos de gravas silíceas embebidos en una matriz de lodo la cual era emitida por salsas y grifos clásticos, estos elementos fueron similares a los encontrados en las brechas encontradas en el volcán San Diego a diferencia que esta era emitida solamente por grifos clásticos.

## 6.2.CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA

La cartografía geomorfológica se realizó con base en la "*Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*" realizada por el SGC la cual propone adoptar el sistema de clasificación morfogenética basado en la metodología ITC, porque cumple con los requisitos necesarios, además de poseer una estructura de fácil adaptación a las necesidades de todas las instituciones y fundamentalmente porque es una metodología de reconocimiento mundial, aplicada y difundida en Colombia (Carvajal, 2012). Las geoformas identificadas en el mosaico obtenido de la zona de estudio, fueron clasificadas teniendo en cuenta la jerarquización geomorfológica establecida en el documento mencionado; cabe resaltar, que una jerarquía de unidades o categorías gomorfológicas se pueden definir en una región dada, dependiendo de la escala de trabajo (Carvajal, 2012); así mismo este documento plantea una serie de nomenclaturas las cuales se utilizaron a la hora de nombrar los rasgos geomorfológicos. El resultado del proceso de jerarquización fue el siguiente (Tabla 10):

### 6.2.1. GEOMORFOESTRUCTURA

Considerando que la geomorfoestructura se refiere a grandes áreas geográficas o amplios espacios continentales o intracontinentales, caracterizados y definidos por estructuras geológicas y topográficas regionales que han tenido deformación o basculamiento y, posiblemente, metamorfismo o intrusión ígnea (Carvajal, 2012). Se consideró que la zona de estudio pertenece al ***sistema orogénico costero y márgenes continentales.***

**Tabla 9.** Jerarquización de rasgos geomorfológicos encontrados en el volcán San Diego.

| Geomorfoestructura | Provincia | Región | Unidad | Nomenclatura | Subunidades | Nomenclatura | Componentes | Nomenclatura |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Sistema orogénico costero y márgenes continentales | Cinturón montañoso del Sinú | Ambiente de volcanismo sedimentario (Vs) | Volcán de lodo San Diego | SD | Coladas | VsSDC | Coladas Antiguas | VsSDCa |
| | | | | | | | Coladas Recientes | VsSDCr |
| | | | | | Conglomerado de grifos | VsSDCg | Grifos Burbujeadores | VsSDGb |
| | | | | | | | Grifos Clásticos | VsSDGc |
| | | | | | | | Grifos Extintos | VsSDGe |
| | | | | | | | Grifos Salpicaduras | VsSDGs |
| | | | | | Conglomerado de Salsas | VsSDCs | Salsas | VsSDS |
| | | | | | | | Piscinas | VsSDP |

### 6.2.2. PROVINCIA

Corresponde a un conjunto de regiones con geoformas parecidas y definidas por un macrorrelieve y una génesis geológica similar (Carvajal, 2012), se clasificó la zona de estudio dentro de la provincia del ***Cinturón montañoso del Sinú***, Carvajal (2017) afirma que el volcanismo de lodo es un fenómeno que se desarrolla predominantemente en rocas del llamado "Cinturón del Sinú".

### 6.2.3. REGIÓN

Carvajal (2012) establece que una región gemorfológica es la agrupación de geoformas relacionadas genética y geográficamente, definidas por los ambientes morfogenéticos y geológicos afectados por procesos geomórficos parecidos; los ambientes geomorfogenéticos aluden a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas en las cuales se generaron las geoformas. La zona de estudio pertenece al ***Ambiente de Volcanismo Sedimentario*.**

### 6.2.4. UNIDAD

En cuanto a la unidad, dado que esta es definida como la unidad básica de la cartografía geomorfológica (Carvajal, 2012), se consideró como unidad geomorfológica al ***Volcán de lodo San Diego*** objeto de estudio de esta investigación.

### 6.2.5. SUBUNIDADES

Las subunidades se clasificaron de acuerdo con los contrastes morfológicos y morfométricos, que relacionan el tipo de material o la disposición de éstos con la correspondiente topografía del terreno (Carvajal, 2012); por ello, dentro de las subunidades encontradas, se tienen (figura 16):

- Coladas
- Conglomerado de grifos
- Conglomerado de salsas

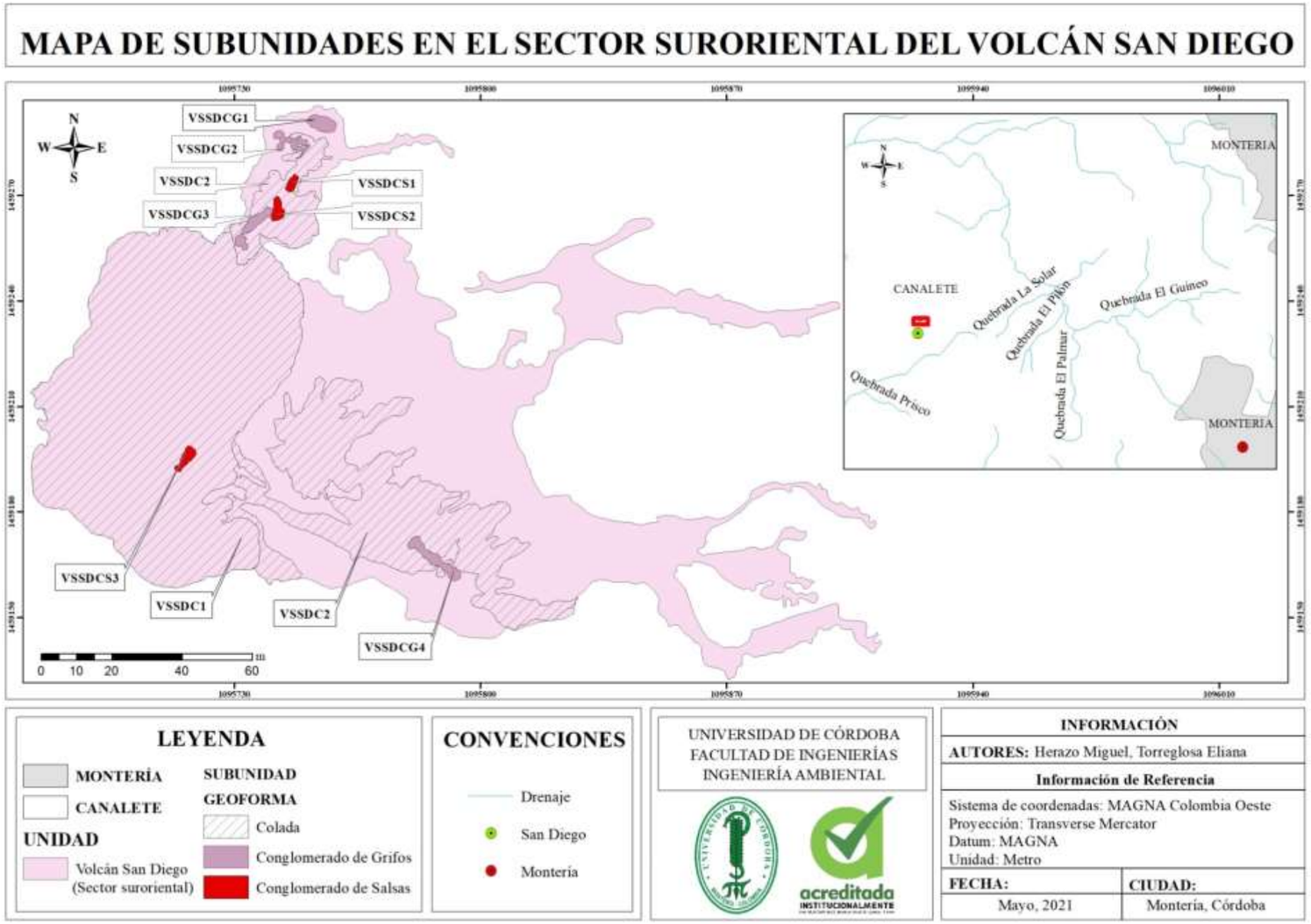



Figura 25. Mapa de subunidades geomorfológicas. Fuente: Propia

Cada una de estas subunidades son descritas en detalle en la tabla 10

**Tabla 10. Características de las subunidades**

| Nombre | Descripción | Ubicación | Orientación | Área |
|---|---|---|---|---|
| VsSDCg1 | No se pudo evidenciar los grifos que lo conformaban. Pero se presume que estos pueden ser mayormente extintos. | Se encuentra ubicado hacia la zona noroeste de la zona de estudio. Es el conglomerado que se encuentra alineado más hacia el norte. | En el conglomerado 1 los grifos tienen una orientación de oeste a este observándose una mayor concentración en la zona central de este. | 29,6 m² |
| VsSDCg2 | Conglomerado de grifos donde se hallaron 8 grifos extintos y 2 grifos burbujeadores, se pueden observar algunas coladas disecadas provenientes de los burbujeadores. | Se ubica hacia la zona noroeste de la zona de estudio. | Este conglomerado no se agrupa uniformemente, sin embargo, se logra observar una orientación del noroeste hacia el sureste. | 28,6 m² |
| VsSDCg3 | Conglomerado de grifos donde se hallaron 2 burbujeadores, 1 clástico, 2 salpicadura, 2 extintos en los cuales no se pudo observar actividad reciente a salvo del grifo burbujeador que contaron con un | Este conglomerado se encuentra hacia el noroeste de la zona de estudio pero un poco más hacia el sur que los conglomerados anteriores. | A diferencia de los anteriores, este presenta una alineación de suroeste a noreste, observándose una alineación uniforme en secuencia. | 36,6 m² |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | pequeño flujo de lodo. | | | |
| VsSDCg4 | Conglomerado de grifos donde se hallaron 4 burbujeadores. 1 salpicadura, 1 clástico en los cuales se puede evidenciar actividad reciente por los flujos de lodo presentes. | Se ubica hacia la parte sur de la zona de estudio y es el único conglomerado de grifos que logró identificarse hacia esta región. | Presenta una orientación de noroeste a sureste con una geometría medianamente alineada, se podría decir que este es el conglomerado mejor alineado. | 46,5 m² |

Los conglomerados de salsas se describen en la tabla 11

Tabla 11. Características de los conglomerados de salsas.

| **Nombre** | **Descripción** | **Ubicación** | **Orientación** | **Área** |
|---|---|---|---|---|
| VsSDCs1 | Conglomerado de salsas que consta de 3 de estos elementos, presenta una geometría ovalada y se encuentra acompañado de una extensa colada que denotó un flujo reciente. | Este conglomerado se encuentra ubicado hacia la parte noroeste de la zona de estudio. Cercano a otros conglomerados de salsas y de grifos. | Presenta una orientación de noreste a suroeste. | 15,6 m² |
| VsSDCs2 | Conglomerado de salsas que está constituido por 3 de estos elementos, de los cuales, el de mayor tamaño se ubica hacia el sur, generando así una geometría poco uniforme. | Se encuentra ubicado en la parte noroeste de la zona de estudio, situándose sobre la colada SvSDC2, que se ubica hacia el norte. | Se orienta de norte a sur. | 17,7 m² |
| VsSDCs3 | Este | Se ubica hacia | Se orienta de | 20 m² |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | conglomerado presentó características particulares puesto que los cráteres observados tendieron a verse más cerca que en los otros conglomerados, en campo, se pudo confirmar que este constaba de 6 cráteres de salsas a las cuales se les observó un burbujeo constante. | la parte suroeste de la zona de estudio, sobre la colada SvSDC1 situada hacia el oeste de la zona de interés y rodeado de grifos mayormente burbujeadores. | noreste a suroeste. | |

Las coladas observadas presentaron las características plasmadas en la tabla 12.

Tabla 12. Características de las coladas.

| Nombre | Descripción | Ubicación | Orientación | Área |
|---|---|---|---|---|
| VsSDC1 | Esta subunidad es una colada reciente, fue notorio por su color con características más oscuras, Se encontraron varios componentes dentro de ella, en su gran mayoría asociados a expulsión de flujo de lodo | Se ubica hacia el suroeste de la zona de estudio. Se sitúa sobre la colada expulsada con anterioridad, es decir, la colada SvSDC2, posicionándose como capas, una sobre otra. | Se observa que esta colada se orienta desde el centro hacia todas las direcciones, desplazándose mayormente hacia el norte y el sur gracias a la topografía del terreno. | 5305,2 $m^2$ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | y coladas con contenidos recientes. | | | |
| VsSDC2 | Es una colada más antigua que la anterior, se deduce por su tonalidad más clara y se asocia con depósitos desecados. | Esta colada se ubica en la parte noroeste y en la parte sur desplazándose desde el centro hacia el este. | La parte que se observa hacia el norte, se orienta en esa dirección, de suroeste hacia noreste. El polígono encontrado en el sur, se desplaza desde la colada SvSDC1 hacia el este de la zona de estudio. | 2751,9 $m^2$ |

Al analizar las subunidades en esta cartografía geomorfológica, se pudo observar que la mayoría de los conglomerados, se ubicaron en la parte norte de la zona generando orientaciones que probablemente estén asociadas a la topografía del terreno. Además, en el caso de las coladas, en la colada SvSDC1, se logran encontrar mayormente elementos asociados con la expulsión de lodos y se prevé que sobre esta se encuentra situado el centro de emisión de la última erupción; durante la salida de campo se observó el elemento asociado a una salsa que probablemente pudo ser el principal centro de emisión en la erupción del año 2020.

### 6.2.6. COMPONENTES

Los componentes son los elementos de máximo detalle en la subdivisión propuesta por Carvajal (2012), se encontraron un total de 8 en la zona de estudio distribuidos en toda la unidad (Anexo 2). Las geoformas asociadas a los componentes encontrados considerando tanto filtraciones como depósitos, fueron las siguientes:

| | |
|---|---|
| -Grifos Salpicadura | -Salsas |
| -Grifos Burbujeadores | -Piscinas |
| -Grifos Clásticos | -Coladas Antiguas |
| -Grifos extintos | -Coladas Recientes |

Para una observación a detalle de cada uno de estos elementos y su distribución se subdividió el sector de la unidad en zonas de interés, enfatizando los sectores en los que se observó la presencia de los componentes así:

**ZONA 1**

La zona 1 se ubicó hacia el noroeste de la unidad y se observó en ella la presencia de todos los componentes clasificados. En esta zona se encontraron 71 componentes en total de los cuales, 22 pertenecen a depósitos y 49 a filtraciones. Si bien es cierto que se observó la presencia de todos, hubo algunos que predominaron en términos de cantidad; hacia esta zona, los depósitos se constituyen mayormente de coladas recientes, se observaron un total de 18 coladas recientes en comparación con las antiguas de las cuales solo se encontraron 4. Para el caso de las filtraciones, las que se presentaron en mayor cantidad fueron los grifos extintos con un total de 15 grifos, constituyendo en su gran mayoría conglomerados de grifos y las que se presentaron en menor cantidad fueron los grifos clásticos con un total de 3 componentes. Esta zona es el sector con mayor variedad de elementos de todas las zonas observadas incluyendo tanto componentes como subunidades y es importante resaltar la dirección que toman las coladas tanto recientes como antiguas en el sector y que están relacionadas con la inclinación del terreno, se puede notar que en el centro en la dirección norte – sur la altura es mayor con respecto a los extremos puesto que la dirección de las coladas permite entre ver que estas se dirigen desde el centro hacia los extremos.

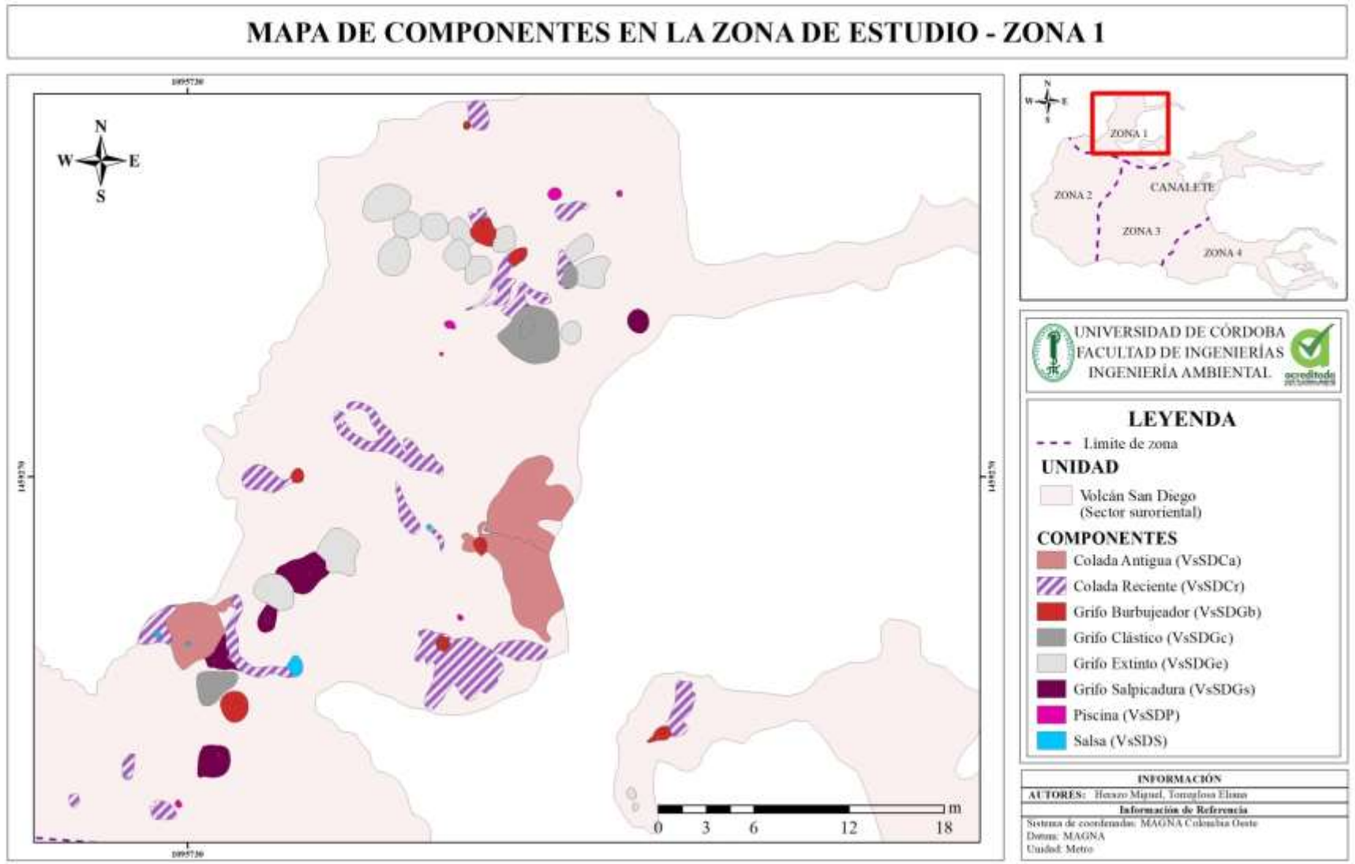



FIGURA 26. Mapa de componentes en el sector suroriental del Volcán San Diego - ZONA 1Fuente: Propia.

**ZONA 2:**

La zona 2, se ubica hacia la zona suroeste de la unidad, esta abarca gran parte de la superficie ocupada por la colada VsSDC1 y en ella, no se observaron coladas antiguas sino únicamente coladas recientes (en cuanto a los depósitos). Hacia el centro de la zona, se alinean grifos tanto burbujeadores como salpicadura y además, se observa la presencia de varias piscinas cerca de estos. En total se encontraron 34 componentes, habiendo 14 depósitos y 20 filtraciones, dentro de las cuales se registraron: grifos burbujeadores, grifos salpicadura, salsas, piscinas y grifos clásticos, siendo los grifos burbujeadores los que compraron la gran mayoría, un total de 8 para ser más exactos.

A continuación, en la tabla 13, se presentan los componentes encontrados en relación a la cantidad de ellos registrada en la zona 2:

Tabla 13 Inventario de elementos encontrados en la zona 2

| Componente | Cantidad |
|---|---|
| Coladas recientes | 14 |
| Coladas antiguas | 0 |
| Grifo burbujeador | 8 |
| Grifo clástico | 2 |
| Grifo Extinto | 0 |
| Grifo salpicadura | 2 |
| Piscina | 5 |
| Salsa | 4 |

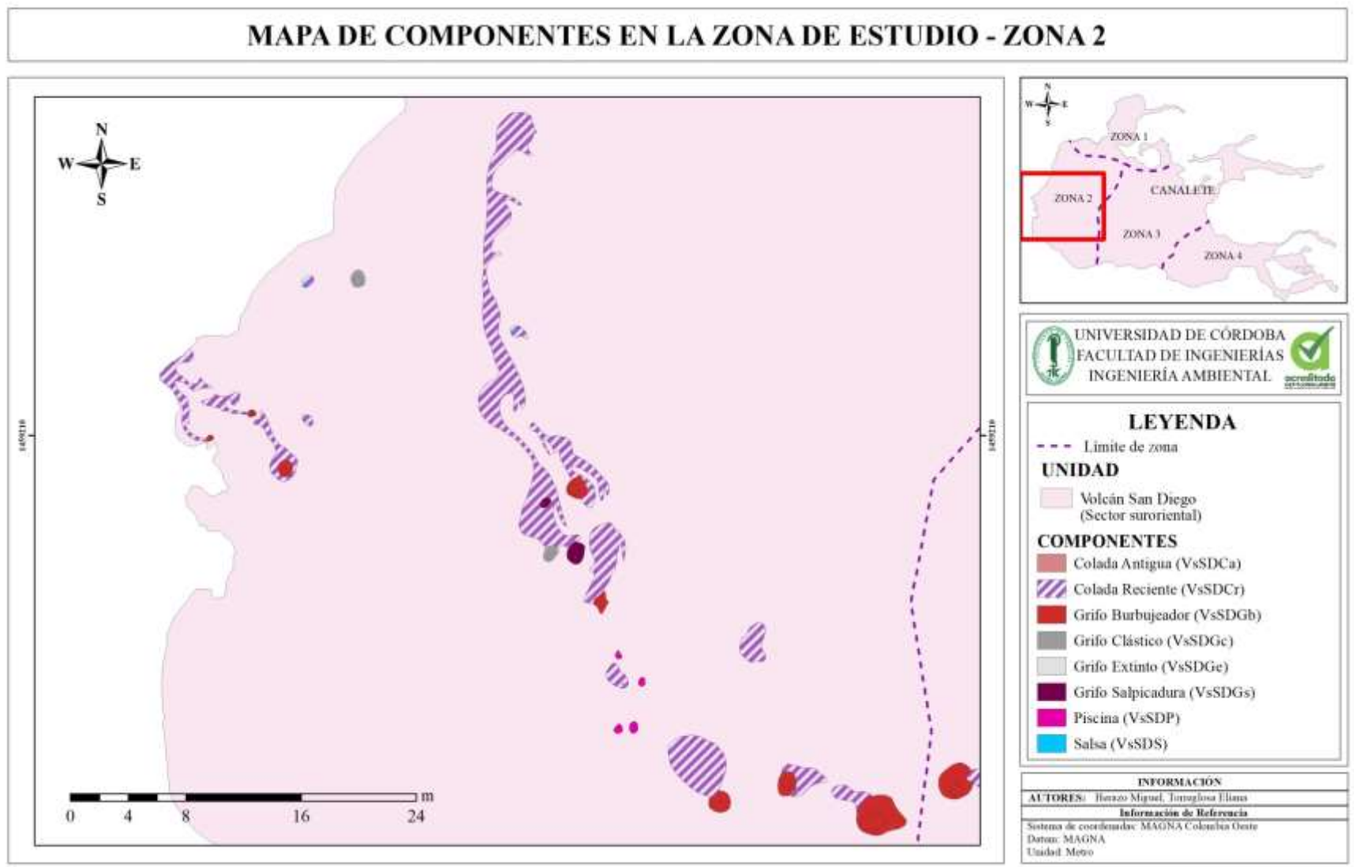



FIGURA 27Mapa de componentes en el sector suroriental del volcán San Diego - ZONA 2. Fuente: Propia.

**ZONA 3**

La zona tres se ubica hacia el sur en la parte céntrica de la unidad (Figura 19), presenta extensas coladas antiguas y una gran variedad de grifos, se encontraron 44 componentes, de los cuales, 13 consisten en depósitos de coladas recientes y 7 depósitos de coladas antiguas, ahora, si bien es cierto que las coladas antiguas son menos en términos de cantidad, estos son los componentes que abarcan una mayor extensión en el área de estudio, como es el caso de la colada SvSDCa1, la cual es la colada antigua más extensa que se encuentra no solo en la zona sino en toda la unidad alcanzando una extensión de 539,9 m². Las coladas antiguas se logran observar como grandes depósitos que se extienden a lo largo de la zona 3 y que en su desplazamiento se orientan en un sentido noroeste a sureste. Esta es la zona con mayor predominancia de grifos burbujeadores y a esto precisamente se debe la presencia de las grandes y extensas coladas. Se observaron pocos grifos extintos y tan solo una piscina. Cabe agregar además, que en esta zona se encuentra el grifo extinto más grande de toda la unidad geomorfológica con un área de 16,4 m². En conclusión, en la zona 3 se observaron las geoformas más extensas en términos de área. Las cantidades de cada uno de los elementos encontrados se registran en la tabla 14.

Tabla 14. Inventario de componentes encontrados en la Zona 3.

| Componente | Cantidad |
|---|---|
| Coladas recientes | 13 |
| Coladas antiguas | 7 |
| Grifo burbujeador | 10 |
| Grifo clástico | 3 |
| Grifo Extinto | 1 |
| Grifo salpicadura | 2 |
| Piscina | 2 |
| Salsa | 6 |

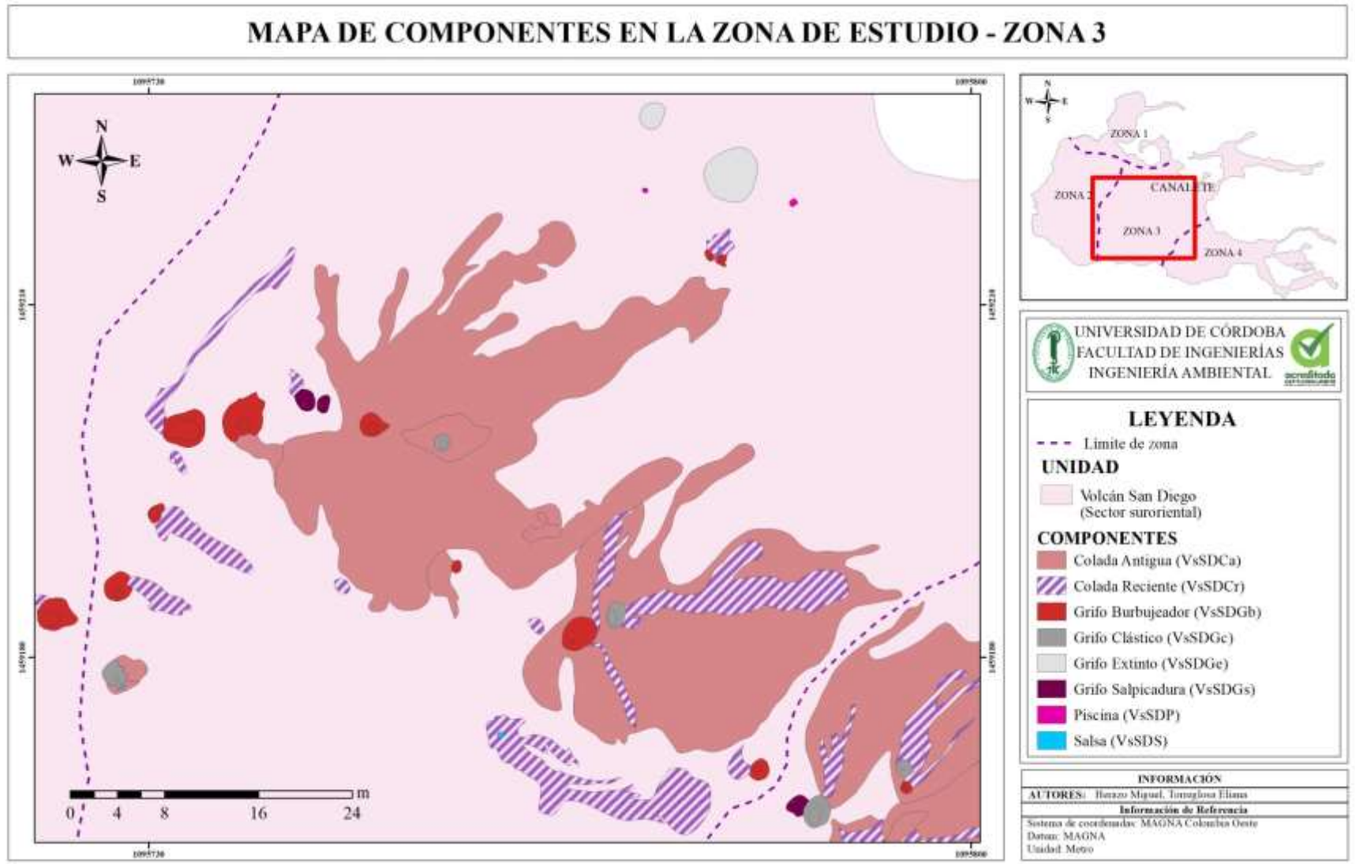



FIGURA 28. Mapa de componentes en el sector suroriental del volcán San Diego - ZONA 3. Fuente: Propia

**ZONA 4**

Esta zona se ubica hacia la parte sureste de la unidad (figura 20). En ella se logran observar pocos elementos pero significativos, ya que esta presenta algunas de las coladas antiguas más extensas siendo la SvSDCa13 la más extensa de la zona con un área de 196,3 m², seguida de la VsSDCa14 que tiene un área de 134,4 m². En total se registraron 23 componentes en la zona representando a cada uno de los clasificados previamente. En esta zona e registró la piscina más extensa encontrada la cual alcanza un área de 5,7 m² convirtiéndose así en la más representativa de toda la unidad. Las coladas por su parte, tuvieron una tendencia de orientación hacia el noreste en su desplazamiento exceptuando la colada VsSDCr3 la cual se extendió hacia el este. La salsa encontrada ocupó un área bastante pequeña (0,006 m² para ser más exactos). La cantidad de componentes encontrados en esta zona se registran en la tabla 15.

**Tabla 15. Cantidad de componentes encontrados en la ZONA 4**

| Componente | Cantidad |
|---|---|
| Coladas recientes | 6 |
| Coladas antiguas | 4 |
| Grifo burbujeador | 5 |
| Grifo clástico | 2 |
| Grifo Extinto | 3 |
| Grifo salpicadura | 1 |
| Piscina | 1 |
| Salsa | 1 |

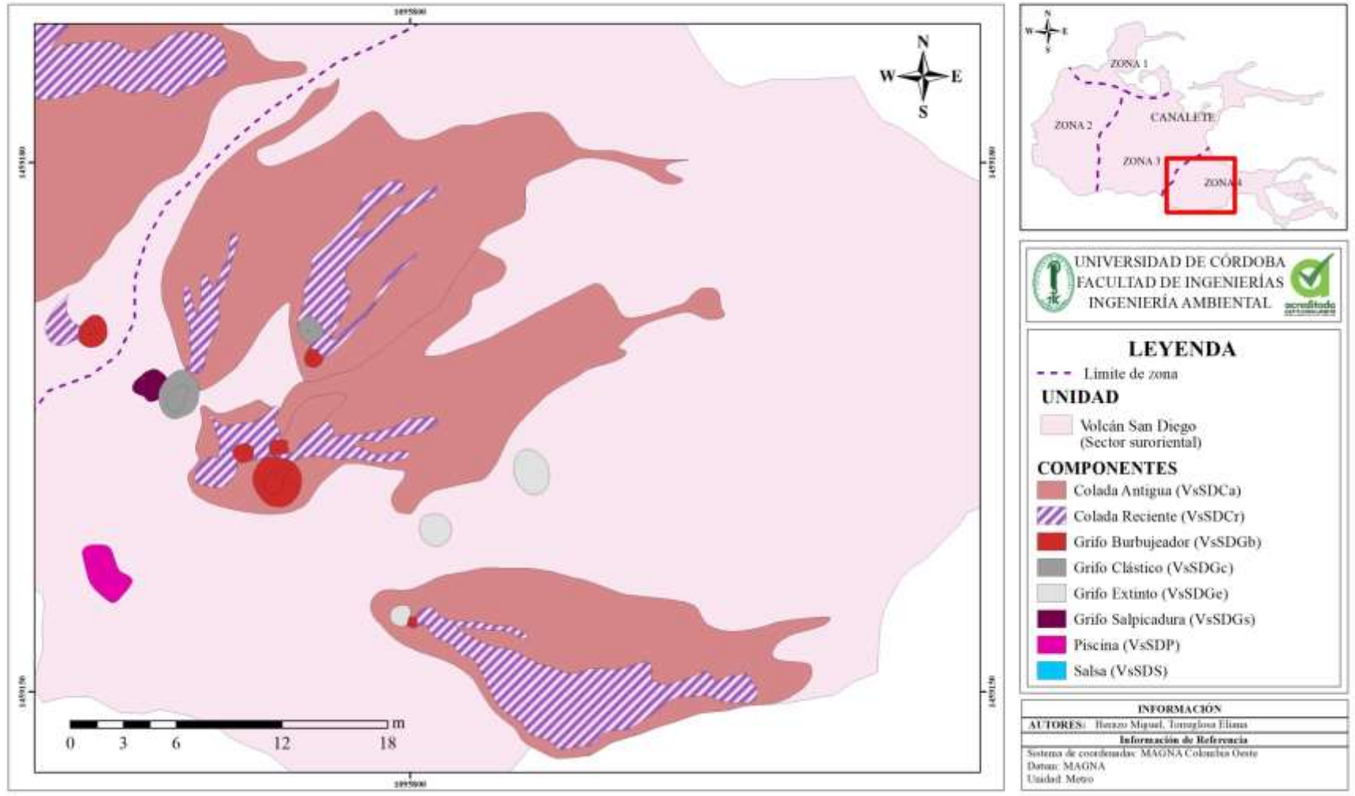



FIGURA 29. Mapa de componentes en el sector suroriental del volcán San Diego – ZONA. Fuente: Propia.

## 6.3.CORRELACION DE AMENZAS.

Al analizar la información proporcionada por los informes de eventos eruptivos ocurridos en el volcán San Diego y las características de las geoformas encontradas, se asociaron tres tipos de amenazas en el sector: Incendios, Expulsión violenta de brecha de lodo y expulsión de flujo de lodo.

Se observó que algunas de las características de los geoformas tienen relevancia al momento de realizar el análisis de amenazas en la zona de estudio, puesto que hay algunas características como tamaño del cráter, presencia de material en él, tipo y emisión de material, área expulsada de material, que definen el comportamiento de la geoforma en términos de actividad y por ende, son definitivos en el análisis de amenazas que puedan generar.

En el caso de los grifos clásticos, estos se caracterizaron por emitir coladas de brecha de lodo, material que consiste en lodo acompañado por materiales clásticos que pueden tener decenas de centímetros, los grifos burbujeadores y salsas presentaron una constante emisión de coladas de flujo de lodo, dicho material suele formar coladas de gran tamaño que cubren gran cantidad del terreno , los grifos salpicaduras no presentaron emisión de coladas de flujo de lodo porque su emisión principal son gases. Estas características dan una idea de qué tipo de amenaza puede estar asociada a cada tipo de geoforma, por lo tanto, se realizó una matriz de correlación entre las geoformas encontradas con las amenazas descritas anteriormente.

Tabla 16. Matriz de correlación de amenazas. Fuente: Propia.

| | TIPO DE GEOFORMAS | | | | | | | | | | | | | CARACTERÍSTICAS | | TIPO DE AMENAZA | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| COD. | GRIFOS | | | | PISCINAS | | | | | SALSAS | | | | | | | | |
| | | | | | TAMAÑO | | | DISTANCIAS | | TAMAÑO | | | | | | | | |
| | GC | GB | GS | GE | TIPO A | TIPO B | TIPO C | D1 | D2 | TIPO A | TIPO B | TIPO C | | TIPO DE MATERIAL | AREA ($m^2$) | Expulsión violenta de brecha de lodo | Expulsión de flujo de lodo | Incendios |
| **SVLGC2** | X | | | | | | | | | | | | | Brecha de lodo | 7,04 | X | | |
| **SVLGC5** | X | | | | | | | | | | | | | Brecha de lodo | NA | X | | |
| **SVLGB30** | | X | | | | | | | | | | | | Flujo de lodo | 49,80 | | X | X |
| **SVLGB21** | | X | | | | | | | | | | | | Flujo de lodo | 3,87 | | X | X |
| **SVLGS1** | | | X | | | | | | | | | | | Gases | NA | | | X |
| **SVLP1** | | | | | X | | | | X | | | | | Agua | 5,74 | **N/A** | **N/A** | **N/A** |
| **SVLS2** | | | | | | | | | | | | X | | Flujo de lodo | 61,01 | | X | X |
| **SVLS25** | | | | | | | | | | | X | | | Flujo de lodo | 0,43 | | X | X |
| **SVLGE1** | | | | X | | | | | | | | | | NA | 0,51 | **N/A** | **N/A** | **N/A** |

**Área**: hace referencia al área de la colada del material expulsado a la superficie por la geoforma. **N/A:** No aplica. Cuando dicha geoforma no emite material a la superficie o este no se pudo medir

**Salsas**: Tipo A: tamaño (<0,02 m²), Tipo B: tamaño (0,02 m² < 0,2 m²), Tipo C tamaño (> 0,2 m²)

**Pisicinas**: Tamaño: Tipo A (<0,5 m²), Tipo B (0,5 m² < 3 m²), Tipo C (>3 m²), Distancia: D1: La distancia al grifo más cercano es menor o igual a 1 m, D2: La distancia al grifo más cercano es mayor a 1 m

Dentro de las principales amenazas encontradas en el sector Suroriental del volcán San Diego se pueden definir:

### 6.3.1. EXPULSION DE FLUJO DE LODO

En el volcán de lodo Los Aburridos (Arboletes, Antioquia) se realizó una identificación y cartografía de las amenazas presentes. Se encontró que el volumen de lodo emitido en 2002 cuando el volcán entro en actividad fue de 31.604 $m^3$ los cuales, se distribuyeron en un área de 2,9 hectáreas, por lo cual en el volcán fue identificada la amenaza por expulsión de lodo y agua, así mismo en el volcán de lodo Cacahual (Turbo, Antioquia) fue identificada la amenaza alta por expulsión de flujo de lodo debido a las grandes extensiones que se han cubierto con el mimo cuando este entra en erupción, por ejemplo, en 1992 el flujo de lodo cubrió un área de 9,4 hectáreas. Un evento similar ocurrió en agosto de 2008 en el volcán San Diego donde fue expulsado una gran cantidad de lodo el cual recorrió las calles de la localidad sepultando cultivos, vías y animales, por lo cual en el volcán se asocia la amenaza por expulsión de flujo de lodo. Al identificar los materiales expulsados por las geoformas, se concluyó que las filtraciones asociadas con este tipo de amenaza son los grifos burbujeadores y las salsas puesto que son las geoformas cuyo material expulsado consisten principalmente en lodo, además, cabe resaltar que en el caso de los burbujeadores, aun cuando no se dan erupciones violentas, hay una constante expulsión de lodo a la superficie por parte de estos. Los grifos burbujeadores que emitieron mayor colada de flujo de lodo son VsSDGb7 (ubicado en parte central del volcán), VsSDGb30 (ubicado en la sureste del volcán), VsSDGb16 (ubicado en la parte norte del volcán), con un área de 562 $m^2$, 49 $m^2$, 20$m^2$ respectivamente, en cuanto a las salas fueron VsSDS2 (ubicado en la parte norte del volcan), VsSDS19 (ubicada en la parte sur del volcán) emitiendo 61 $m^2$ y 19 $m^2$ respectivamente. Por otra parte, los impactos que pueden generar estos eventos sobre el suelo son de gran relevancia, puesto que al ocurrir de forma frecuente se genera acumulación de lodo trayendo consigo degradación en la estructura del

suelo, la cual, es causada principalmente por la pérdida de estabilidad gracias a la disminución de vegetación por sepultamiento.

### 6.3.2. INCENDIOS

En el volcán de lodo Altos de Mulato (Turbo, Antioquia) se documentó la liberación de gases que al entrar en contacto con el aire generan fuego que quema los objetos cercanos al volcán. En el evento ocurrido en 1993 fueron quemados árboles de roble que tenían alturas superiores a 12 m, por lo cual todas las áreas que de conformidad con las observaciones de la comunidad han sido quemadas fueron clasificadas como amenaza alta en la cartografía de amenazas del volcán, eventos similares se han presentado en el volcán San Diego; en octubre de 1976 ocurrió una erupción explosiva en la que se identificó llamas, en marzo de 1992 el volcán entro en actividad junto con la emisión de gas el cual hizo combustión y ocasionó la quema de pastos y árboles en un área de 300m. Al identificar los materiales expulsados por las geoformas, se concluyó que las filtraciones asociadas con este tipo de amenaza son los grifos salpicaduras, ya que estas son geoformas que expulsan cantidades periódicas de gases que según lo descrito por Carvajal (2001) son metano y $CO_2$. Así mismo otras geoformas como grifos burbujeadores y salsas expulsan gases pero en menor proporción que los grifos salpicaduras esto porque su principal material de emisión son las coladas de flujos de lodo. La generación de incendios puede deberse a la concentración de gases asociados a hidrocarburos y metano y al sellamiento de la estructura volcánica favorecido por la presencia de arcillas con predominio de montmorillonita, que puede generar cámaras de gas bajo presión, que al romperse violentamente, permiten la ignición de los gases al ponerse en contacto violentamente con el aire clorita (Duque 1980, en Vega y Carvajal 1992). ). Este tipo de amenaza se ha considerado como una de las principales en este trabajo dado que los impactos negativos que puede traer consigo pueden ser muy significativos generando afecciones de tipo ambiental, como por ejemplo, las relacionadas con la quema de la

vegetación; económico como es el caso de la pérdida de los cultivos y social en cuanto a problemas en la salud humana.

### 6.3.3. EXPULSION VIOLENTA POR BRECHA DE LODO

Según Vivas (2019) en el recorrido realizado en el volcán de lodo Los Aburridos fueron encontrados fragmentos de rocas y clastos. Encontrando depósitos de arcilla seca en cuya matriz se evidencia fragmentos líticos (clastos) de pocos decímetros a varios centímetros de diámetro, bloques de pirita. En términos generales las rocas grandes podrían parecerse a esferas con radios de 19 cm y a cubos con lados de 22 cm; por lo cual fue identificada la amenaza por material rocoso y clastos en el volcán. En el volcán San Diego Esta amenaza puede ser generada principalmente por los grifos clásticos, los cuales son geoformas que se caracterizan por la expulsión de flujo de lodo con materiales clásticos. Cuando se dan las erupciones violentas los materiales que son expulsados en superficie no solo consisten en clastos o gravas sino también en grandes bloques de rocas (Arenisca, principalmente) de hasta 40 cm de ancho **(**figura 21**)** y que alcanzan hasta los 500 m de distancia del centro de emisión del volcán generando posibles afectaciones no solo medioambientales sino también socioeconómicas. El último evento eruptivo del volcán fue documentado por el periódico la razón, el cual data a la fecha de junio de 2020; en la visita en campo realizado en marzo de 2021 para el desarrollo de esta investigación se pudo notar que el material emitido en esta erupción fue principalmente brecha de lodo debido a la gran cantidad de clastos encontrados en la zona de estudio de hasta 40 cm de anchos, lo que indica que esta erupción se generó por actividad de los grifos clásticos.

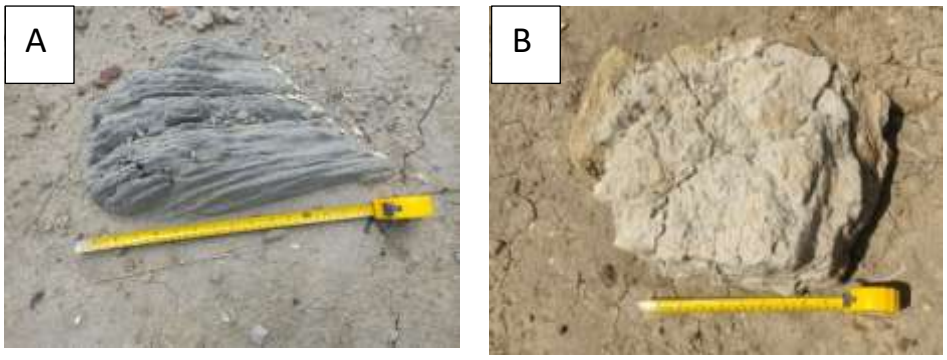



Figura 30. Clastos encontrados en la zona (A) Clasto (B) clasto. Fuente: Propia.

Así mismo se ha realizado la caracterización geomorfológica e identificación de amenazas en otros volcanes sedimentarios de Colombia. Martínez et al. (2020), consideran que un sector del volcán el Totumo presenta amenaza alta ante erupción violenta de lodo, brecha de lodo y gas, licuefacción y degradación del suelo. Vivas (2019) realizó la caracterización y amenaza de los volcanes de lodo en los municipios de Turbo, Necoclí, san juan de Urabá y Arboletes considerando que las amenazas encontradas fueron expulsión de flujo de lodo, y materias rocosos, incendios, agrietamiento del terreno.

De forma general, cabe agregar que al realizar el análisis se pudo observar que hay viviendas (como es el caso de la Hacienda Casatabla) las cuales se encuentran dentro de la zona de influencia del volcán San Diego, al igual que la vía que conecta el casco urbano del municipio de Canalete con el corregimiento El Guineo, vía que presenta un aforo diario considerable; las zonas donde estas se ubican son zonas que pueden verse seriamente afectadas por erupciones violentas del volcán San Diego así como ocurrió en el evento del 2020, durante el cual, como lo indica el diario La Razón (2020), los flujos de lodo alcanzaron a extenderse hasta la vía principal la cual fue completamente obstruidas por estos. Por este motivo, la realización de una correlación con las amenazas principales del volcán San Diego tiene una gran implicación dentro de los ejercicios de

ordenamiento del territorio, los cuales, van encaminados a ordenar el territorio garantizando el uso adecuado del suelo basado en su aptitud y la calidad de vida de los habitantes, por lo tanto, hacer un análisis del comportamiento del volcán San Diego es de gran importancia al momento de realizar estos ejercicios de planificación, en los que se deben plasmar las zonas de alto riesgo, susceptibles a amenazas y proponer planes que vayan encaminados al uso restringido de las zonas en las que se den este tipo de eventos

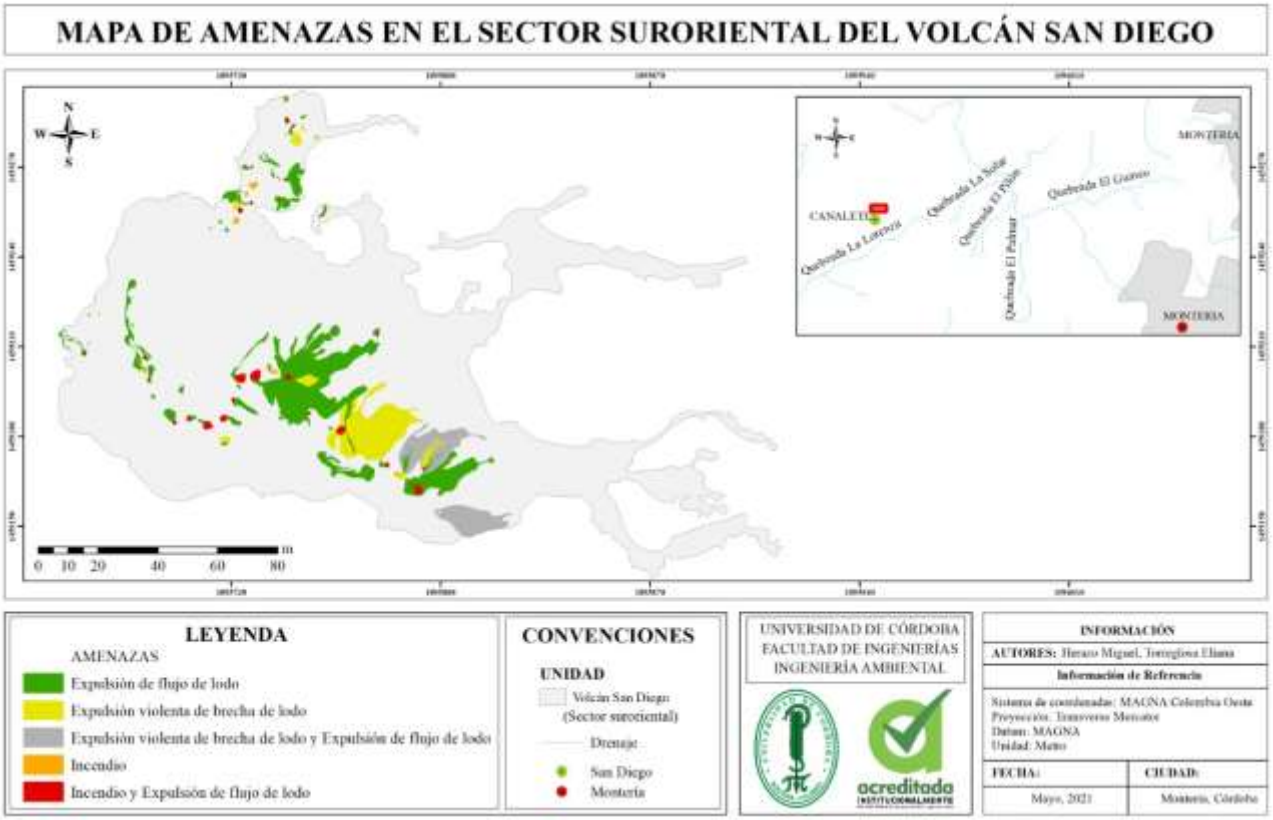



**Figura 31. Mapa de amenazas en el sector suroriental del volcán San Diego**

# 7. CONCLUSIONES.

Con los resultados obtenidos se pudo realizar una cuantificación y clasificación de las geoformas en la zona, obteniendo un total de 110 filtraciones conformadas por 10 grifos salpicaduras, 31 grifos burbujeadores, 9 grifos clásticos, 20 grifos extintos, 27 salsas y 13 piscinas por lo cual más del 50% de las filtraciones presentes pertenecen a salsas y burbujeadores y en menor porcentaje los grifos clásticos y salpicaduras.

La elaboración de la cartografía geomorfológica a una escala 1:600 es un nivel de detalle relevante teniendo en cuenta que en la zona no se habían realizado una caracterización de las geoformas a esa escala, esta mostró que la mayor predominancia de filtraciones se presentó en la parte norte de la zona de estudio al igual que en la parte sureste donde además se evidencio la mayor cantidad de coladas antiguas, en la parte noreste se evidencio poca presencia de filtraciones al igual que la sureste donde se encontró la mayor cantidad de coladas recientes, esto se debe a que en este sector se puede apreciar una colada reciente de gran tamaño proveniente de actividad reciente de las filtraciones de esa zona.

De acuerdo a las características de las geoformas y lo establecido en la matriz de correlación de amenazas, el sector suroriental del volcán San Diego presenta una amenaza baja por expulsión violenta de brecha de lodo porque los grifos clásticos no superan el 10% del total de filtraciones

y no todos presentaban una emisión de brecha, una amenaza alta por expulsión de flujos de lodo esto porque más del 50% de las filtraciones presentes (salsas y burbujeadores) emiten lodo a la superficie  y amenaza ata por incendios debido a que todas las filtraciones a excepción de las piscinas emiten cantidades diferentes de gases. .

# 8. RECOMENDACIONES

Debido a la poca información acerca del volcanismo sedimentario en el país, se recomienda realizar más estudios que puedan explicar la dinámica de este fenómeno, en el caso del volcán San Diego se hace necesario para una caracterización geomorfológica completa la toma de imágenes satelitales con mejor resolución acompañados con la elaboración de modelos de elevación digital (DEM) del volcán lo cual permitiría detallar aún más las características de las filtraciones presentes. Esta toma de imágenes podría realizarse anualmente, con esto se tendría una registro completo de la dinámica de las filtraciones a través del tiempo, igualmente se conocería si hay algún efecto en las filtraciones el hecho de que se encuentren en temporada seca o temporada de lluvias.

En pro de estandarizar los conceptos relacionados a esta temática es recomendable que los diferentes estudios realizados en el país se guíen de la propuesta de estandarización estipulada por SGC esto con el fin de crear un lenguaje universal cuando se hable de esta temática.

Son pocas las cartografías geomorfológicas de filtraciones en volcanes de lodo las que se encuentran documentadas en el país, lo cual es un impedimento a la hora de contrastar y complementar información, por lo cual se recomienda que este tipo de información, si existe, no sea de difícil acceso y obtención.

Se recomienda incluir lo relacionando a amenazas del volcán San Diego en los ejercicios de ordenamiento del municipio, a su vez, mediante capacitaciones, charlas, darle a conocer a la comunidad las amenazas a las que se encuentran presentes en el sector para evitar catástrofes. Así mismo la creación de planes de contingencia para cuando el volcán entre en erupción.

## 9. BIBLIOGRAFIA.


Cardona, O. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo "elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo". *Revista universitaria de geografía, 7(12), 45-49*. Acceso: Febrero, 2021.

Carvajal, H. y Vega, J. 1992. Características del volcanismo de lodo en el sector de la Lorenza – Córdoba. Informe de Atención a Emergencia. (PDF). INGEOMINAS. Cartagena, Colombia. Acceso: Febrero, 2021.

Carvajal, H. 2001. Diagnóstico de la amenaza por volcanismo de lodo en el Sector de La Lorenza- El guineo, municipio de Canalete, Departamento de Córdoba. (PDF). INGEOMINAS. Córdoba, Colombia. Acceso: Marzo, 2021.

Carvajal, H. 2012. Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. (PDF). Servicio Geológico Colombiano. Bogotá, Colombia.

Carvajal, H. 2017. Volcanismo de lodo del caribe central colombiano. (En línea) Servicio Geológico Colombiano. Bogotá, Colombia. Acceso: Octubre, 2019. https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/volcanismo-lodo.pdf

Carvajal, H. y Carrillo, E. 2018. Características de la actividad eruptiva reciente del volcán de lodo de San diego - La Lorenza, municipio de Canalete – Córdoba. Lineamientos para la evaluación de amenazas y riesgos

asociados a volcanismo de lodo. (en línea). Servicio Geológico Colombiano. Acceso: Octubre, 2019. https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opacdetail.pl?biblionumber=73763&shelfbrowse_itemnumber=74367#shelfbrowser

Chen, S. Hsu, S. Wang, Y. Chung, S. Chen, P. Tsai, C. Liu, C. Lin, H. Lee, Y. 2014. Distribution and characters of the mud diapiris and mud colcanoes off southwest. Journal of Asian Earth Sciences. ISSN: 1367-9120 (en línea), 92: 201-214, 1 octubre 2014. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.10.009. Acceso: marzo (2020).

El Confidencial. 2016. Viaje a la 'Pompeya de Indonesia': el volcán de barro que se tragó 12 pueblos. El confidencial (en línea). Acceso: Octubre, 2019. https://www.elconfidencial.com/mundo/2016-04-01/viaje-a-la-pompeya-de-indonesia-volcan-barro-que-se-trago-12-pueblos_1172372/.

Espinoza, R. Plata, M. y Casada, H. 2013. Geomorphologic characterization of the natural protected area nevado de toluca, complex volcanoes: Nevado de Toluca and San Antonio. Universidad Nacional Autónoma de México. (PDF). http://www.scielo.org.mx/pdf/cuat/v9n1/2007-7858-cuat-9-01-00006.pd. Acceso: Septiembre (2020).

Higgins, G. y Saunders, J. 1974. Mud Volcanoes: Their Nature and Origin. Verhand. Naturf. Ges. Basel. 84(1).

Hovland, M. Hill, A. y Stokes, D. 1997. The structure and geomorphology of the Dashgil mud volcano, Azerbaijan. Geomorphology, ISSN: 0169-555X (en línea), 21(1): 1-15, noviembre de 1997. https://doi.org/10.1016/s0169-555x(97)00034-2. Acceso: Octubre (2019).

IGAC. Grupo interno de trabajo de interpretación. 2018. Interpretación de materiales geológicos a partir de sensores remotos para la cartografía

geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos. (en línea). http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/procedimientos/procedimientos%202008/2018/G4070004%2018V1%20Interpretacion%20de%20materiales%20geologicos%20a%20partir%20de%20sensores%20remotos%20para%20la%20cartografia%20geomorf%20aplicada%20a%20levan.pdf. Acceso: Febrero (2020).

INGEOMINAS. 2001. Diagnóstico de la amenaza por volcanismo de lodo en el sector de la lorenza-el guineo, municipio de canalete, departamento de Córdoba. (en línea). https://catalogo.sgc.gov.co. Acceso: Febrero (2020).

Judd, A. y Hovland, M. 2007. Seabed fluid flow. Cambridge University Press, p475.

Kopf, A. 2002. Significance of mud volcanism. Reviews of Geophysics. ISSN: 1944-9208 (en línea), 40(2): 50-63, 06 septiembre 2002. https://doi.org/10.1029/2000rg000093. Acceso: Octubre, (2019).

La Voz del Sandinismo. 2013. Erupciones de lodo en volcanes de Azerbaiyán. La voz del sandinismo (en línea). https://www.lavozdelsandinismo.com/internacionales/2013-08-27/erupciones-de-lodo-en-volcanes-de-azerbaiyan/. Acceso: Septiembre 2020.

La Razón.2020. Advierten actividad en el volcán de lodo de Canalete. LARAZON.CO (en linea). https://larazon.co/cordoba/advierten-actividad-en-el-volcan-de-lodo-de-canalete/. Acceso: Agosto, 2020.

Mazzini, A. y Etiope, G. 2017. Mud volcanism: An updated review. Earth-Science Reviews ISSN: 0012-8252 (en línea), 168:81-112, mayo 2017. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001. Acceso: Octubre (2019).

Milkov, A. 2000. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. Marine Geology, ISSN: 0025-3227 (en línea), 167(1-2): 29-42, 15 junio 2000. https://doi.org/10.1016/s0025-3227(00)00022-0. Acceso: Enero (2020).

Planke, S. Svensen, H. Hovland, M. Banks, D. y Jamtveit, B. 2003. Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan, Geo Marine Letters, (en línea), 23(3-4):258-268, 23 octubre 2003. https://doi.org/10.1007/s00367-003-0152-z. Acceso: Enero (2020).

Roberts, K. 2011. Mud Volcano Systems: Structure, Evolution and Processes. Tesis de doctorado, Universidad de Durham, Durham, Reino Unido.

Roberts, K. Davies, R. Stewart, S. y Tingay, M. 2011. Structural controls on mud volcano vent distributions: examples from Azerbaijan and Lusi, east Java. Journal of the Geological Society, 168(4), 1013-1030. (PDF). https://doi.org/10.1144/0016-76492010-158. Acceso: Noviembre (2019).

Stewart, S. 2006. Implications of passive salt diapir kinematics for reservoir segmentation by radial and concentric faults. Marine and Petroleum Geology. ISSN: 0264-8172 (en línea), 23(8): 843-853. Septiembre de 2006. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2006.04.001. Acceso: Octubre (2019).

## ANEXOS

## ANEXO 1

| | | |
|---|---|---|
| VsSDGb12 | Cráter | 0,1120074 |
| | Base | 0,7493294 |
| | Colada | 3,5926931 |
| VsSDGb13 | Cráter | 0,0252577 |
| | Base | 0,5389796 |
| | Colada | 3,5926931 |
| VsSDGb14 | Cráter | 0,5485562 |
| | Base | 1,5582469 |
| | Colada | 14,8241405 |
| VsSDGb15 | Cráter | 0,0705647 |
| | Base | 2,8243785 |
| | Colada | 0,3848574 |
| VsSDGb16 | Cráter | 0,067642 |
| | Base | 0,7580625 |
| | Colada | 20,2080593 |
| VsSDGb17 | Cráter | 0,0284175 |
| | Base | 0,9767395 |
| | Colada | 1,6291239 |
| VsSDGb18 | Cráter | 0,0349463 |
| | Base | 2,1246657 |
| | Colada | 1,0337137 |
| VsSDGb19 | Cráter | 0,1354729 |
| | Base | 0,614028 |

| | | |
|---|---|---|
| | Colada | 3,5268888 |
| VsSDGb20 | Cráter | 0,1005861 |
| | Base | 0,2525522 |
| | Colada | 2,5118814 |
| VsSDGb21 | Cráter | 0,1149756 |
| | Base | 0,9284853 |
| | Colada | 3,8753998 |
| VsSDGb22 | Cráter | 0,2217746 |
| | Base | 0,6855167 |
| | Colada | 16,6616974 |
| VsSDGb23 | Cráter | 0,1789493 |
| | Base | 1,0496317 |
| | Colada | 4,6180787 |
| VsSDGb24 | Cráter | 0,4490796 |
| | Base | 1,7531782 |
| | Colada | 3,3548305 |
| VsSDGb25 | Cráter | 0,0198638 |
| | Base | 1,8041066 |
| | Colada | 12,2243814 |
| VsSDGb26 | Cráter | 0,5686755 |
| | Base | 0,8612356 |
| | Colada | 8,6124163 |
| VsSDGb27 | Cráter | 0,4667558 |
| | Base | 1,7096003 |
| | Colada | 6,8734989 |
| VsSDGb28 | Cráter | 0,0015751 |

| | | |
|---|---|---|
| | Base | 0,1743115 |
| | Colada | 4,6146169 |
| VsSDGb29 | Cráter | 0,0096256 |
| | Base | 0,235478 |
| | Colada | 1,9859436 |
| VsSDGb30 | Cráter | 0,0044103 |
| | Base | 0,3048217 |
| | Colada | 49,8046265 |
| VsSDGb31 | Cráter | 0,0710547 |
| | Base | 1,2580706 |
| | Colada | 5,7105675 |

ANEXO 2.

# MAPA DE COMPONENTES EN EL SECTOR SURORIENTAL DEL VOLCÁN SAN DIEGO

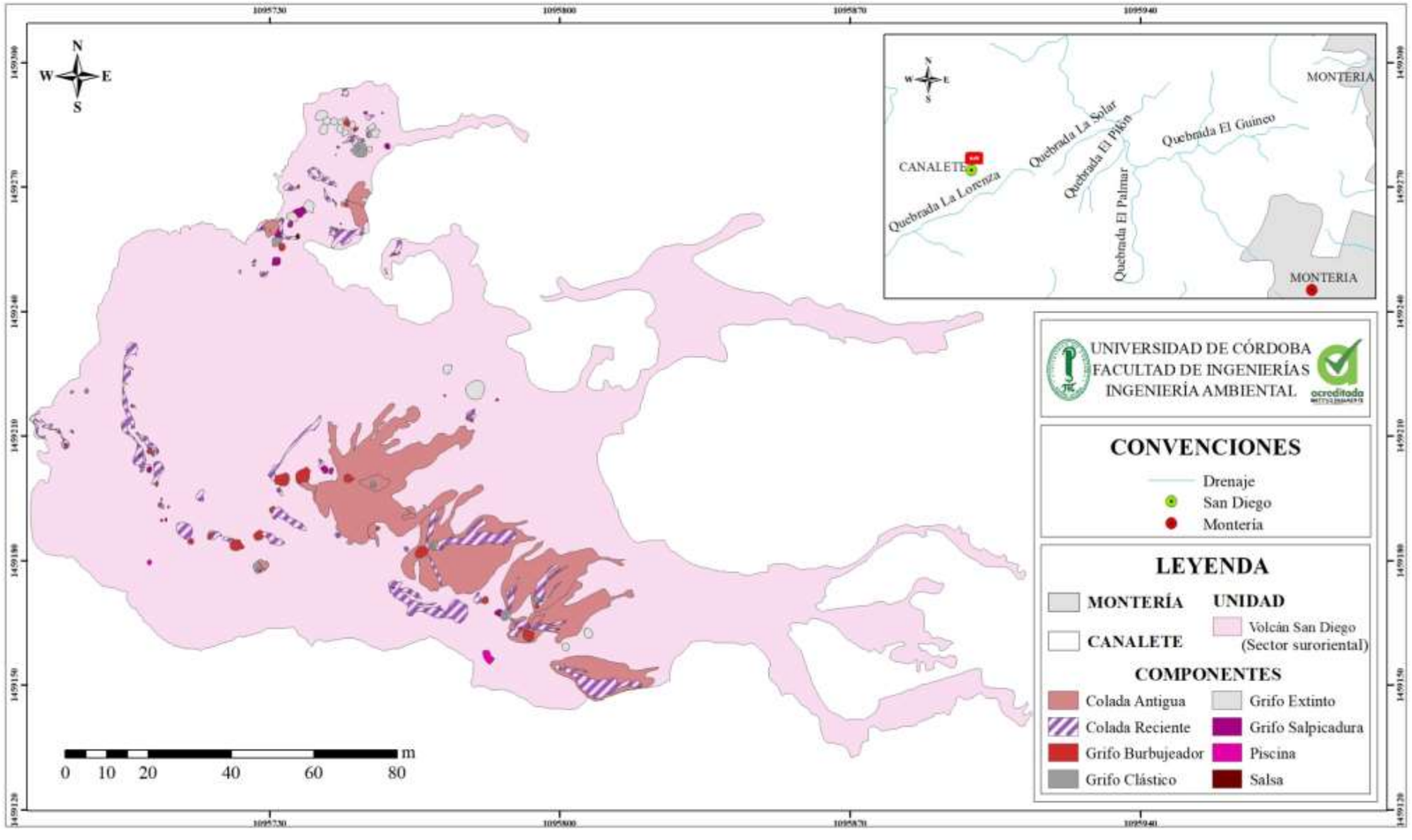



Figura 32. Mapa de componentes volcan San Diego sector suroriental