



Vigilada Mineducación

ZONIFICACIÓN DE LA INFILTRACIÓN POTENCIAL Y LÍNEAS DE FLUJO EN EL PLAY GEOTÉRMICO SIBUNDOY

Presentado por:

Antonio López Zuluaga

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Geólogo

Directora:

Ingeniera Geóloga María Isabel Marín Cerón, PhD

Asesor:

Nicolas Montoya

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA
GEOLOGÍA
MEDELLIN
2023**

Tabla de contenidos

1. Introducción	3
2. Localización	4
3. Marco conceptual y antecedentes.....	5
4. Metodología	6
4.1. Conformación de la base de datos y preparación de mapas temáticos base	7
4.2. Procesamiento para la identificación de características lineales.....	8
4.3. Zonas potenciales de infiltración	10
5. Resultados	11
5.1. Conformación base de datos	11
5.2. Modelo de lineamientos automáticos	12
5.2.1. Análisis de las tendencias de los lineamientos	13
5.2.2. Análisis distribuido y densidad de lineamientos	13
5.2.3. Adaptación al contexto del play geotérmico del Sibundoy	14
5.3. Zonas potenciales de infiltración	15
5.3.1. Caracterización climática	15
5.1.2. Mapas temáticos de variables físicas.....	16
5.2.3. Zonificación de la infiltración potencial.....	17
6. Discusión	18
6.1. Control estructural	18
6.2. Análisis de zonificación de la infiltración potencial.....	20
6.3. Aporte al modelo conceptual	21
7. Conclusiones.....	21
8. Bibliografía.....	23

1. Introducción

Los sistemas geotérmicos aparecen en diversos entornos geológicos y teóricamente en todo el mundo. Para la utilización de los recursos geotérmicos, uno de los factores más relevantes es el calor almacenado a una profundidad perforable, y si este calor se traduce en producción de energía económicamente viable. En ese sentido, los sistemas geotérmicos presentan diversas clasificaciones, que, para efectos de la presente investigación, por las características geológicas, se denominan “Plays” geotérmicos. El régimen térmico y el flujo de calor, el régimen hidrogeológico, la dinámica y química de los fluidos, las fallas y fracturas, el régimen de tensiones y la secuencia litológica están controlados por la tectónica de placas y son factores fundamentales para comprender el sistema del “play” geotérmico (Moeck, 2014).

Cerca del 75% de la producción y prospección geotérmica en el mundo están asociados a las zonas de subducción y los volcanes (Moeck, 2014). En ambientes tectónicos de alta complejidad estructural (p.e. los Andes del Norte), se podrían generar Blind geothermal systems, para los cuales se necesitan estrategias de exploración que retan a la ciencia. (e.g. Occidente de USA; (W.R. Benoit, 1982); (Coolbaugh, 2004)).

Los *Blind Geothermal Systems* corresponden a *plays* geotérmicos controlados estructuralmente, donde se produce un adelgazamiento cortical que permite encontrar el gradiente geotérmico más cercano a superficie, y presentan conductos controlados con un medio fracturado.

Este trabajo se desarrolla sobre el denominado sistema geotérmico del Sibundoy (Ramírez & Marín-Cerón, 2021), ubicado en la subregión del Putumayo, al suroccidente de Colombia en la cordillera Centro-Oriental. El objetivo central es el de aportar al entendimiento de un sistema geotérmico catalogado como mixto, en el cual la fuente de calor es la antigua cámara magmática del volcán del Sibundoy que se manifiesta como conos de ceniza alcalino monogenéticos generalmente pequeños (Marín-Cerón et al., 2019); (Monsalve et al., 2020), donde el flujo de calor se produce a grandes profundidades en la zona de benioff (Marín-Cerón et al., 2019); y se dispersa a lo largo del sistema de fallas San Francisco- Yungillo como respuesta a la configuración tectónica propuesta como una cuenca de tipo pull-apart (Velandia et al., 2005) a lo largo de un límite convergente entre las placas de Nazca y Suramérica.

El sistema estructural es el responsable de la concentración de los procesos hacía el centro de la zona, donde se identifican cuatro emanaciones hidrotermales de interés que se encuentran delimitados por la falla San Francisco en el NW, el sistema de fallas Conejo en el Sur y las Fallas del Tabaida y Mocoa hacia el NE. En el presente proyecto, se realiza un análisis estructural por medio de lineamientos automáticos soportado en un modelo de componentes principales PCA propuesto por Montoya (en publicación) y la zonificación de la infiltración potencial como acercamiento a la comprensión del flujo de agua y calor en la zona, con el fin de refinar el modelo geotérmico conceptual propuesto por (Ramírez & Marín-Cerón, 2021) para el área de Sibundoy, categorizado como un “play” geotérmico controlado por fallas, y a través del medio fracturado, donde la convección del flujo ocurre a lo largo de las fallas regionales, y se da la mezcla de agua hidrotermal y meteórica a lo largo de la dirección NE-SW (Ramírez, 2021). El presente enfoque, promueve el entendimiento de cómo

los procesos geológicos conductivos y advectivos ayudan a traer el calor necesario para los prospectos geotérmicos, cerca de la superficie (p.e. cuencas pull-apart del Sibundoy).

2. Localización

La zona de estudio se enmarca en el sistema geotérmico de Sibundoy (SGSV), localizado en la subregión del Putumayo, en la cordillera Centro- Oriental, al suroccidente de Colombia. El sistema hidrotermal se extiende sobre un área de aproximadamente 100 kilómetros cuadrados, en una zona geotérmica que alberga cuatro fuentes termales; (1) Termal de Balsayaco, (2) Termal de Colón, (3) Termal la Josefina y (4) Termal del Sibundoy, los cuales a excepción del termal de Balsayaco se ubican sobre depósitos cuaternarios alrededor del Valle de Sibundoy y el volcán del mismo nombre.

La ocurrencia de estos manantiales termales está asociada a afluentes de bajo orden que llegan al río San Pedro y Putumayo (CORPOAMAZONIA, 2006), donde el flujo de calor se produce a lo largo del sistema de fallas de San Francisco-Yunguillo e involucra las litologías que forman parte de la geología de la plancha 430 Mocoa del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2021), donde afloran rocas desde el Proterozoico hasta depósitos del Cuaternario. El Sibundoy es un área de complejidad tectónica, donde el Sistema de Fallas de Algeciras presenta relevos o saltos laterales, en ocasiones difíciles de relacionar, debido en parte a la presencia de fallas transversales en dirección NW (Velandia , Acosta, Terraza Melo, & Villegas, 2005) Este contexto tectónico relaciona rocas metamórficas como El Complejo Migmatítico La Cocha-Río Téllez (MP3NP1-Mag), junto con grandes cuerpos plutónicos de características intrusivas como el Batolito de Mocoa (J-Pi) y el Batolito de Sombrerillos (J-Pi1).

El Complejo Migmatítico de La Cocha-Río-Téllez involucra anfibolitas, migmatitas, esquistos y gneises. Se dispone en un contacto fallado con rocas sedimentarias del Cretácico como la formación Caballos (b6k1?-Sctm), Villeta (K2v) y Rumiyaco (k6E1-Stm); y el Batolito de Sombrerillos (Ramirez & Marín-Cerón, 2021); además, es parcialmente cubierta por lavas y piroclastos del Cuaternario (Restrepo et al., 2021). Según (Nuñez, 2003), el Batolito de Sombrerillos varía entre cuarzo-monzonita, granodiorita, granito, monzogranito y gabronorita. Está en contacto fallado con lodolitas paleozoicas y calizas de la Formación Villeta (k1?k5-Sm) y con la Formación Saldaña (J-VCC)

Los lineamientos geológicos asociados a la traza principal de la Falla de Algeciras, configuran un fallamiento con un importante componente vertical (Velandia et al., 2005). El valle del Sibundoy es la principal depresión de la región, y se originó por la tensión local a lo largo del desplazamiento del sistema de fallas que configuran una cuenca de tipo “Pull-apart”. La falla principal en este sector es la falla de San Francisco, que controla la morfología en el flanco sur de la cuenca.

El volcán Sibundoy se encuentra en la posición de arco posterior del segmento volcánico sur presentando una composición alcalina, el cual se manifiesta como campos monogenéticos de conos de ceniza, escoria y lavas basálticas (Marín-Cerón et al., 2019); (Monsalve et al., 2020), la presencia de estos campos monogenéticos en estos sistemas transtensionales han sido propuestos como la etapa final del arco volcánico en el sistema de subducción (Marín-Cerón et al., 2019).

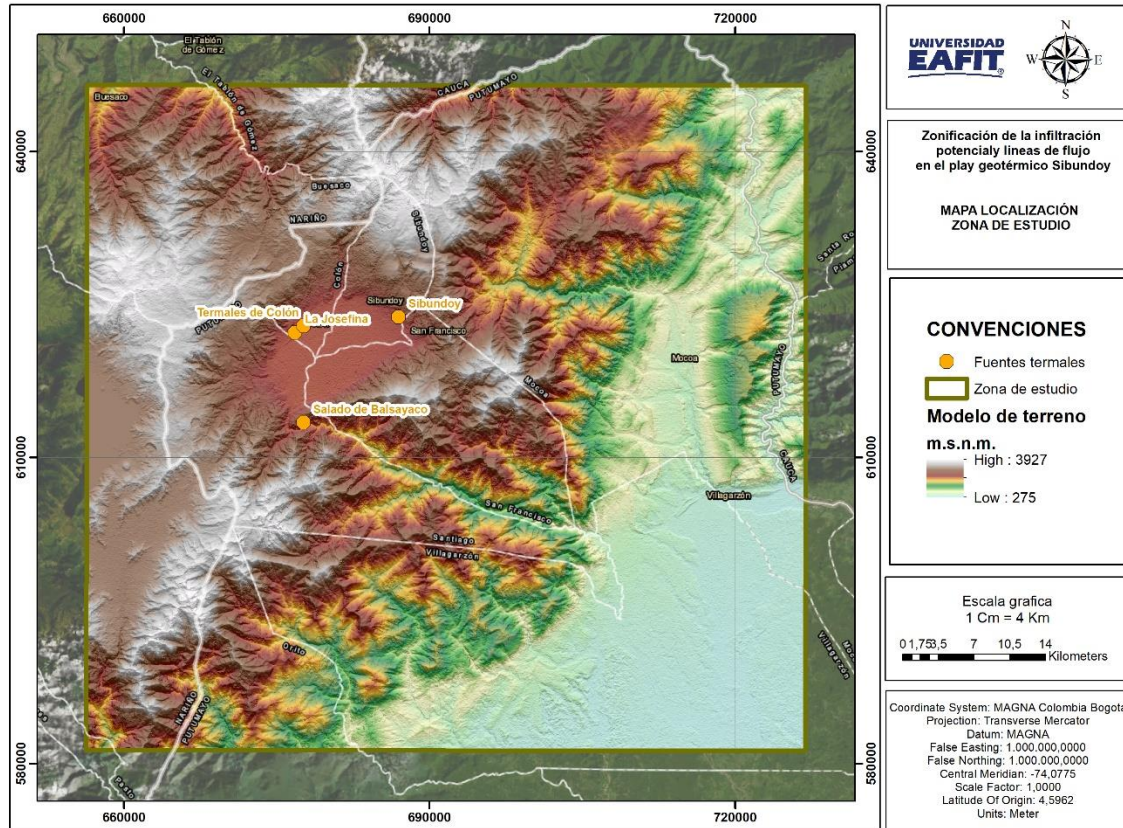


Figura 1. Localización general de la zona de estudio. Elaboración propia.

3. Marco conceptual y antecedentes

Existen 84 sistemas geotérmicos a nivel mundial, asociados a arcos volcánicos producto de las zonas de subducción, que generan un vulcanismo de diferentes características conforme avanzamos en superficie respecto a la zona de subducción (Stelling et al., 2016). De esta manera, se presentan volcanes de pequeño volumen que se clasifican en monogenéticos y poligenéticos usando dos criterios; en el sentido de la clasificación petrogenética y en el sentido de la arquitectura del volcán (Smith & Németh, 2017). Los campos monogenéticos son pequeños volcanes espaciados unos con otros y comúnmente asociados a fuentes magmáticas profundas que con el tiempo pueden formar pequeños cluster alineados a lo largo de los sistemas estructurales (Smith & Németh, 2017).

El entorno geodinámico del norte del Bloque Andino (BNA) está controlado por la interacción entre las Placas de Nazca, Sudamericana y del Caribe. Esta configuración incluye el desarrollo de una zona de subducción a lo largo del margen continental del noroeste de América del Sur, donde Marín-Cerón et al. (2019), propone que los procesos registrados a lo largo del tiempo representan la interacción entre los fluidos/fundidos provenientes de la placa subducida, el metasomatismo del manto y la fusión parcial, la interacción de los magmas derivados del manto con la corteza inferior y superior, y los parámetros de emplazamiento.

Pedraza-García et al. (2007), propone la ubicación de los volcanes recientes en el Bloque Andino del Norte en relación con el modelo geométrico de subducción de la Placa de Nazca segmentada en cuatro bloques. El desarrollo de este trabajo se centra en la parte norte del bloque C, donde se encuentra una serie de volcanes monogenéticos asociados al movimiento transpresivo regional de las fallas Colon y Algeciras.

La propuesta es un sistema geotermal activo asociado a terrenos de características transpresivas en donde el flujo de calor está dominado por los sistemas estructurales que capturan aguas meteóricas que viajan a reservorios profundos, en donde alcanzan una fuente de calor que permite a su vez que dicho calor alcance la superficie, evidenciado en las fuentes termales. Para la zonificación potencial de la infiltración se utilizan las metodologías aplicadas a la zonificación de la recarga potencial como lo es el método heurístico para la superposición jerárquica de mapas temáticos, en función de comprender los procesos de mezcla entre agua meteórica e hidrotermal en el sistema geotérmico.

Como hipótesis se plantea que en un campo monogenético como el del SW de Colombia (Sibundoy), el sistema geotérmico se encuentra ligado a la transferencia de calor a lo largo del medio fracturado (fallas Sibundoy y Colón), el cual controla a su vez la mezcla de agua (meteórica/hidrotermal), en función de la densidad de fracturamiento.

4. Metodología

Para el desarrollo de la metodología se agruparon tres secciones principales relacionadas con los objetivos específicos propuestos: (1) Geodatabase para estimación de la recarga potencial y direcciones de flujo; (2) Modelo de lineamientos automáticos a partir de análisis PCA; y (3) Delimitación espacial de zonas potenciales de infiltración. La diagramación metodológica conceptual de este proyecto se presenta en la Figura 2.

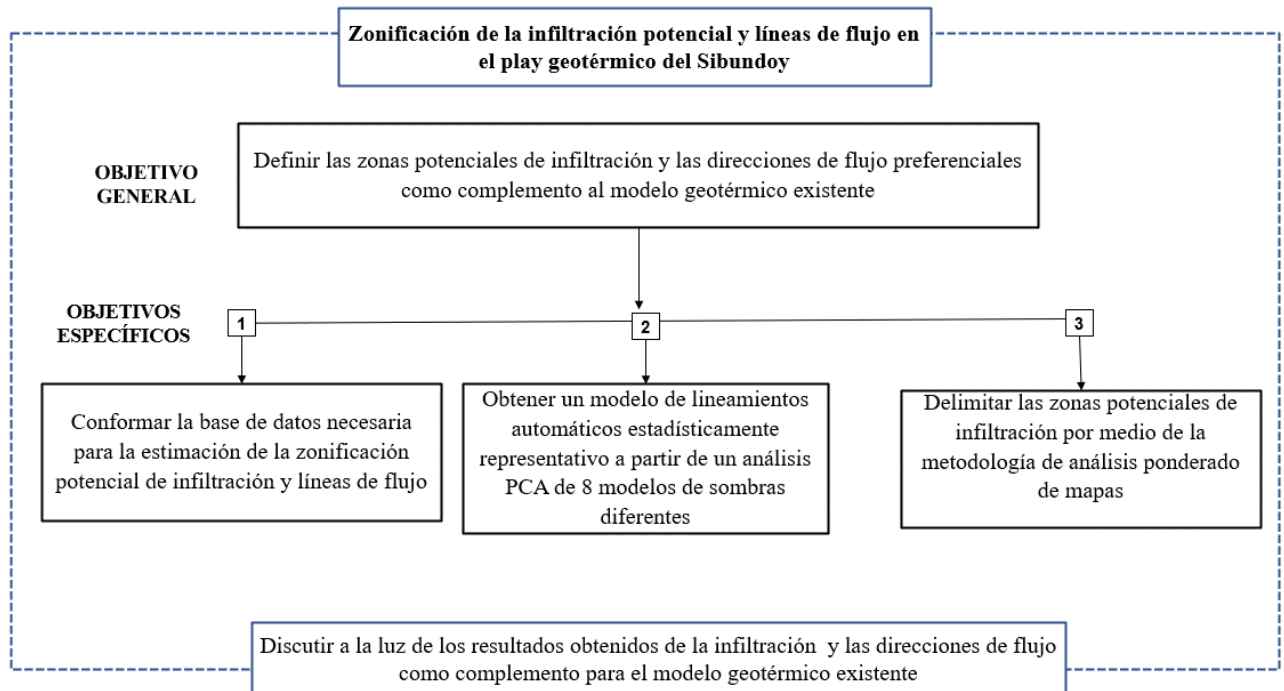


Figura 2. Flujograma metodológico general del proyecto. Elaboración propia

4.1. Conformación de la base de datos y preparación de mapas temáticos base

La conformación de la base de datos para estimar la recarga potencial y direcciones de flujo fue de gran importancia para generar la matriz de mapas y zonificar las zonas potenciales de infiltración en el play geotérmico del Sibundoy. Se consultaron trabajos como el de Ramirez et al. (2021), la geología del SGC (2021), las fallas principales y el modelo estructural de Velandia et al. (2005), y toda esta información se complementó con archivos espaciales de variables físicas como coberturas vegetales, suelos y variables climáticas como precipitación y evapotranspiración potencial. Para el análisis del terreno se utilizó un modelo de elevación digital de alta resolución (High resolution DEM) a escala de píxel de 12.5 x 12.5 mt del satélite Alos Palsar. Modelos digitales de sombras a partir de análisis PCA

Los análisis de teledetección estructural se derivaron de los datos del modelo de elevación digital proporcionado por el satélite Alos Palsar en formato GeoTIFF. El preprocesamiento se desarrolló con los softwares ArcMap v10.8 y PCI Geomatica 2016. Las técnicas de análisis de sombreado del relieve se utilizaron en este proyecto, son ampliamente aplicadas en regiones activas tectónicamente para reconocer características lineales con orientaciones particulares (Radaideh et al., 2016).

Para comparar la respuesta del terreno bajo diferentes ángulos de incidencia de la luz, se generaron ocho modelos de sombras cada 45° con inclinación constante de 30° y un modelo de aspecto del terreno que evaluó la dirección de flujo en las laderas, con el fin de lograr que

las sombras expongan elementos que no son visibles bajo otros ángulos de inclinación, siguiendo la propuesta de Mark (1992).

Con el fin de reducir el ruido y complementar estadísticamente la valoración de las superficies de sombras involucradas en el análisis de los lineamientos automáticos, se implementó un análisis estadístico PCA (Componentes principales) que ayudó a reducir la dimensionalidad de las ocho superficies y evitar información redundante en términos de frecuencia asociada a una misma dirección. El análisis PCA agrupa estadísticamente los datos en función de su varianza y se identifican dos grupos de modelos de sombras de los que se obtienen las superficies definitivas más relevantes para replicar el procedimiento propuesto por Mark (1992).

Es importante mencionar que los mapas de relieve sombreado generados en los modelos tradicionales enfatizan las estructuras que están iluminadas oblicuamente, pero eliminan las estructuras que están iluminadas a lo largo del dominio estructural (Mark, 1992). Bajo esta premisa se ejecutó un análisis estadístico que parte de una matriz de correlación asociada al centroide de una celda de 1 km x 1km dentro de la zona, de los cuales se obtuvo el valor arrojado en cada uno de los modelos. Esta matriz, con valores cercanos a 1 y -1, muestra que las superficies presentan una alta correlación y pueden considerarse como complementarias, mientras que los valores cercanos a 0 indican superficies diferentes entre sí y que pueden representar rasgos del terreno con tendencias en diferentes direcciones.

Finalmente, por medio de un código de procesamiento en el software MatLab, se obtuvieron las dos superficies agrupadas en dos componentes principales (PC): el primer PC está representado por la conjugación de los modelos de 135°, 180°, 225° y 270°; y el segundo PC agrupa a modo de superficie complementaria los modelos de 225°, 270°, 315° y 360°.

4.2. Procesamiento para la identificación de características lineales

El método se basa en simular el efecto de la luz artificial que llega desde una fuente puntual de iluminación con una altura y azimut específicos (p. ej., (Bastón et al., 1975); (Horn, 1981). Según el azimut de iluminación y la inclinación elegidos, las características se oscurecen o resaltan en una imagen sombreada (Radaideh et al., 2016).

Se adoptó un método de relieve sombreado ponderado oblicuo multidireccional (MDOW) (Mark, 1992). para generar una imagen sombreada iluminada desde diferentes ángulos azimutales de la fuente de luz a partir de pesos relativos al modelo de aspecto general del terreno (Radaideh et al., 2016). La combinación de diferentes ángulos de iluminación en una sola imagen proporciona información valiosa sobre los diferentes patrones espaciales de las características lineales que no serían visibles si solo se usara una sola imagen iluminada (Radaideh et al., 2016).

La propuesta presentada por Mark (1992), implementa cuatro modelos de sombras, 225°, 270°, 315° y 360°, ponderados por el factor oblicuo obtenido de la ecuación 1, sin embargo, y con el fin de adaptar los hallazgos del análisis de componentes principales, se corrió un modelo comparativo para las superficies PCA que se presentan en la ecuación 2, siguiendo

los lineamientos del modelo MDOW (Mark, 1992), con las superficies de 135°, 180°, 225° y 270°.

$$W(225^\circ) = \sin^2 \text{aspect} - 225^\circ$$

$$W(270^\circ) = \sin^2 \text{aspect} - 270^\circ$$

$$W(315^\circ) = \sin^2 \text{aspect} - 315^\circ$$

$$W(360^\circ) = \sin^2 \text{aspect} - 360^\circ$$

Ecuación 1. Propuesta de ponderación MDOW. Tomado de Mark, 1992.

$$W(135^\circ) = \sin^2 \text{aspect} - 135^\circ$$

$$W(180^\circ) = \sin^2 \text{aspect} - 180^\circ$$

$$W(225^\circ) = \sin^2 \text{aspect} - 225^\circ$$

$$W(270^\circ) = \sin^2 \text{aspect} - 270^\circ$$

Ecuación 2. Propuesta de ponderación MDOW + PCA. Adaptado de Mark, 1992.

Para la obtención de los modelos de sombra ponderados por el factor oblicuo, se implementó el algebra de mapas siguiendo las ecuaciones 3 y 4, para el modelo propuesto por Mark (1992), y el modelo ajustado al análisis PCA, respectivamente.

Imagen ponderada Mark (IPM)

$$\text{IPM} = (W(225^\circ) * \text{Sombras}225^\circ) + (W(270^\circ) * \text{Sombras}270^\circ) + (W(315^\circ) * \text{Sombras}315^\circ) + (W(360^\circ) * \text{Sombras}360^\circ)$$

Ecuación 3. Obtención de la imagen ponderada. Propuesta de ponderación MDOW. Tomado de Mark, 1992.

Imagen ponderada PCA (IPPCA)

$$\text{IPPCA} = W(135^\circ) * \text{Sombras}135^\circ + W(180^\circ) * \text{Sombras}180^\circ + W(225^\circ) * \text{Sombras}225^\circ + W(270^\circ) * \text{Sombras}270^\circ$$

Ecuación 4. Obtención de la imagen ponderada. Propuesta de ponderación MDOW + PCA. Adaptado de Mark, 1992.

Una vez generados los modelos de sombras se procedió a obtener los lineamientos automáticos en el software Geomática 2016, mediante el uso del algoritmo “LINE EXTRACTION”, el cual fue configurado de acuerdo con lo propuesto por Radaideh et al.

(2016), incluyendo estos filtros y umbrales: RADI (Filter Radius)=24; GTHR (Edge Gradient Threshold)=70; LTHR (Curve Length Threshold)=30; FTHR (Line Fitting Threshold)=3; ATHR (Angular Difference Threshold)=7; y DTHR (Linking Distance Threshold)=70.

Posteriormente se verificaron los datos obtenidos y se eliminaron los datos erróneos para las longitudes menores a 100 metros, considerados como “ruido” en la adquisición por la escala de trabajo propuesta (1:100.000). La determinación de la dirección dominante, basada en la frecuencia de los lineamientos, puede no ser siempre correcta y debe ser contrastada con tendencias locales y regionales definidas en la cartografía. Este grado de incertidumbre puede explicarse por el hecho de que los lineamientos extraídos automáticamente suelen ser cortos y muchas líneas individuales pueden representar un solo lineamiento largo

4.3. Zonas potenciales de infiltración

La metodología para la delimitación conceptual de las zonas de infiltración se asocia con la evaluación del potencial intrínseco de la zona a permitir infiltración, que puede convertirse en recarga. Estas metodologías corresponden a una evaluación del terreno a partir de la ponderación heurística de una serie de variables zonificadas espacialmente.

Mediante el procesamiento de la base de datos en los softwares Qgis v3.28.2 y ArcMap 10.8, se ejecutó la evaluación de las siete (7) variables de manera individual de 1 a 5 en función de su capacidad intrínseca a permitir infiltración, siendo 5 la más favorable y 1 zonas poco favorables.

En la clasificación por *geología (GEO)* se evalúan propiedades texturales de las rocas como porosidad, granulometría y compactación. Tal como lo afirma el IDEAM (2017), es importante considerar la litología para inferir condiciones de porosidad primaria y en algunos casos fracturamiento que configure porosidades secundarias. Las rocas consolidadas por lo general tienen importancias bajas a medias debido a su baja porosidad primaria, mientras que las terrazas aluviales y los abanicos recientes corresponden a sedimentos no consolidados con porosidad primaria alta, por lo que es común asignarles una clasificación alta.

Las pendientes (PND) están directamente relacionadas con la delimitación de las unidades geomorfológicas que podrían favorecer procesos de infiltración, y estas a su vez con la inclinación del terreno. Esta variable se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y un eje horizontal, y podemos expresar su valor en grados (0° - 90°), o en porcentajes (0%-100%) (IDEAM, 2010). En este caso se propone una delimitación a partir del análisis de la inclinación en grado ($^{\circ}$), donde es común asumir que las zonas de baja pendiente favorecen la infiltración, mientras que en zonas donde predominan pendientes más altas se generan mayor escorrentía.

La densidad de fracturamiento (DF) se asocia a la presencia tanto de elementos estructurales cartografiados y referenciados en la literatura, como a lineamientos inferidos del MDT, y su peso depende en gran medida de la densidad de trazos asociados a un área específica. En este caso, y tomando como referencia las cuadrículas de análisis mencionadas de 1 x 1 km, se sugiere una clasificación donde más de 10 elementos lineales se considera como el valor máximo (5) y donde no exista la presencia de lineamientos o sea de como máximo un trazo se califica como 1.

El parámetro usado para la ponderación de *los suelos* es la *textura (TXS)*. Esta zonificación parte del mapa nacional de Ecosistemas (IDEAM, 2017), donde para efectos de las condiciones intrínsecas es conveniente que el experto asigne ponderadores bajos a la presencia de granulometría fina, medios para granos más gruesos de buena selección y altos para texturas predominantemente gruesas con matrices favorables y un marcado espesor.

Las coberturas vegetales (CV) se clasifican teniendo en cuenta su favorabilidad frente a la capacidad de infiltración y escorrentía superficial. Las coberturas de bosque, pasto arbolado y vegetación secundaria alta favorecen la infiltración del agua en superficie, se asignan importancias altas; seguidas de pastos limpios y vegetación secundaria baja; mientras que los cultivos y la zona urbana son las menos favorables frente a la infiltración. Esta zonificación parte del mapa nacional de Ecosistemas (IDEAM, 2017)

Finalmente, las *variables climáticas* que intervienen en la evaluación de las zonas potenciales de infiltración son la *precipitación (PP)* y la *evapotranspiración potencial (ETP)*, ambas partiendo de las superficies promedio multianuales globales del Satélite CHLSA para un periodo entre 1979 y 2020. En este caso, y considerando que estas variables responden en gran medida a la incertidumbre propia de cada procesamiento para distribuir espacialmente los datos, se sugiere dividir en cinco (5) rangos iguales las variables climáticas para la zona de estudio. De esta manera, precipitaciones más altas se evalúan con los valores mayores, mientras que, para el caso de la ETP, zonas de mayores valores indican una menor probabilidad de permitir infiltración.

Esta calificación individual se complementó con la técnica AHP, modelando el problema a través de una estructura jerárquica que usa una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro (IDEAM, 2017). De este modo, la propuesta de una evaluación ponderada combinó las escalas correspondientes a los diferentes criterios, sintetizó los juicios emitidos por el grupo de trabajo y entregó un ordenamiento de las alternativas de acuerdo a los pesos obtenidos (prioridades) en un factor de ponderación individual.

Una vez evaluadas y reclasificadas las variables, se creó un mapa digital a partir de la ponderación del criterio heurístico independiente, y mediante la herramienta “álgebra de mapas” se realizó la superposición de los siete mapas espaciales bases utilizados con su respectivo factor ponderador, tal como se resume en la Ecuación 5.

$$ZPR = (0.07*GEO) + (0.16*TXS) + (0.11*CV) + (0.13*DF) + (0.15*PND) + (0.25*ETP) + (0.09*ETP)$$

Ecuación 5. Propuesta para la obtención y ponderación de las características intrínsecas

5. Resultados

5.1. Conformación base de datos

Como resultado del primer objetivo se presentan las fuentes cartográficas utilizadas como base para los procesamientos posteriores en la Tabla 1. El mapa de estudios índice se presenta como síntesis de todos los estudios encontrados para la zona, estudios que a su vez, permiten establecer la caracterización de un contexto geológico dado por la configuración estructural

propuesta por Velandia (2005), la validación de un contexto asociado a una zona de subducción, como es el patrón tipo sierra de elementos trazas propuesto por Marín-Cerón, (2019), y la caracterización térmica asociada a zonas de fallas de cabalgamiento que dan como resultado procesos de advección de las isothermas (Ramírez et al., 2021) dichos estudios permiten generar una adecuada caracterización base de la zona de estudio.

Tabla 1. Conjunto de datos geográficos recopilados para cada variable temática.

Información	Fuente	Descripción	Producto
Modelo digital de elevación	ALASKA / ALOS PALSAR	Modelo digital de elevación Como entrada para la generación de variables espaciales.	Mapa de pendientes, mapas de sombras a diferentes ángulos y lineamientos automáticos.
Red estructural	Servicio Geológico Colombiano (2021) Velandia, et al. (2005)	Cartografía de fallas regionales y análisis estructural asociado	Comportamiento regional, análisis estructurales de unidades particulares
Geología	Servicio Geológico Colombiano (2021)	Unidades litológicas implicadas en el área de estudio.	Extensión de las unidades, propiedades, contactos etc.
Precipitación	Chelsa climate (1979-2020). WorldClim (1970-2000)	Serie histórica de precipitaciones mensuales para construir el ciclo anual (1970-2020).	Superficie distribuida del promedio multianual para Colombia. 1970-2010.
Evapotranspiración potencial	IDEAM (1981-2010)	Valores de evapotranspiración potencial en valores multianuales (1981-2010).	Superficie distribuida del promedio multianual para Colombia. 1981-2010.
Suelos	IDEAM (2017)	Unidades de clasificación de suelos (SCU), para la identificación de parámetros texturales.	Índices de textura
Cobertura vegetal	IDEAM (2017)	Cubiertas terrestres de tercer nivel, para el procesamiento de infiltración.	Tipo de vegetación

5.2. Modelo de lineamientos automáticos

Gráficamente los dos modelos propuestos responden de manera casi complementaria entre sí, destacando características asociadas a diferentes rasgos morfotectónicos. Los elementos

de relieve positivo representan topografías elevadas como crestas topográficas y escarpes, mientras que los rasgos de relieve negativo representan en su mayoría fallas, valles, trincheras y diaclasas (Radaideh et al., 2016).

Para efectos de la presente investigación los lineamientos automáticos utilizados para el desarrollo de este trabajo son el resultado de la unión entre las dos propuestas para imágenes ponderadas, ya que, al analizar el segundo componente principal obtenido en la matriz de correlación, se sugieren como superficies de sombras tipo PCA-2 las direcciones propuestas por Mark (1992), (225° , 270° , 315° y 360°). Los lineamientos resultantes de la unión se procesan nuevamente en SIG para evitar la superposición de tendencias de amplia longitud que puedan imprimir incertidumbre en el desarrollo de las diagramaciones.

5.2.1. Análisis de las tendencias de los lineamientos

Luego del post procesamiento se obtuvieron un total de 2.724 lineamientos que comprenden alrededor de 4.527 km de longitud en un área de 4.601 km². En general, es posible afirmar que en la superficie presentada en la figura 4 se captura de manera adecuada la tendencia estructural regional NE-SW a N-S, expresada geomorfológicamente por la propuesta de Velandia (2005). de una cuenca de tracción desarrollada a lo largo del desplazamiento dextral de la falla de rumbo de Algeciras que genera finalmente una cuenca pull-apart. Estos desplazamientos resultan en fallas Riedel, sintéticas y antitéticas que se pueden observar en dirección W-E, y otras como la falla de Colón y la falla de Sibundoy con una tendencia NW-SE (Ramirez & Marín-Cerón, 2021).

5.2.2. Análisis distribuido y densidad de lineamientos

Para mapear los tres índices de densidad de lineamientos, propuestos por Saepuloh et al. (2017), como L_l (Longitud de lineamientos), L_f (frecuencia de ocurrencia), L_i (densidad de intersecciones) se ejecuta una interpolación de kriging ordinario ajustado según la propuesta metodológica al modelo esférico o exponencial.

Tal como se presenta en la figura 3, la zonificación de la longitud de los lineamientos oscila en un rango de 0 a 9 km con valores más altos hacia el SW y NE de la cuenca del Sv con una tendencia que se repite en el número de lineamientos con valores de 0 a 11 y por su parte el número de intersecciones con rango de 0 a 18 presenta los valores más elevados en la parte SW de la zona de estudio. En los tres índices de densidad de lineamientos implementados se observa que la zona SE carece de lineamientos, al igual que el punto de superposición de la falla San Francisco con la falla Sibundoy.

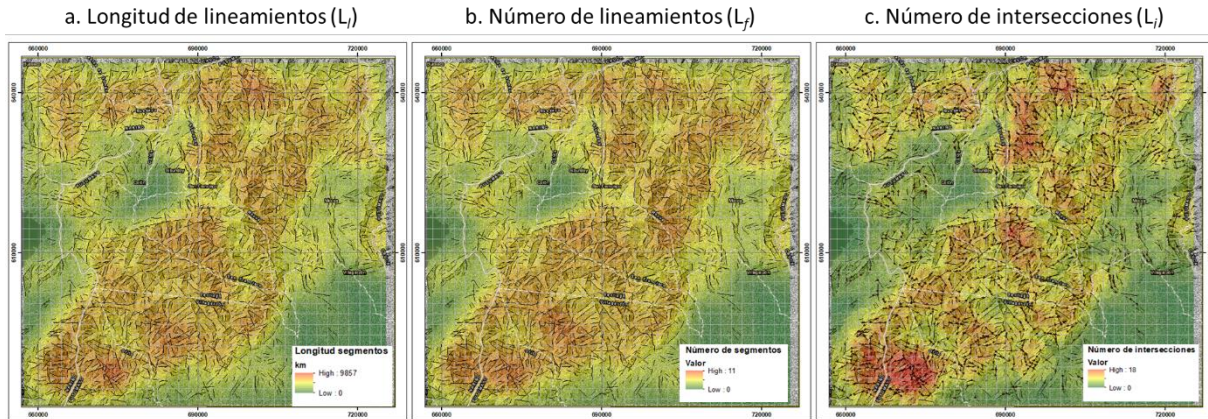


Figura 3. (a) Mapa de longitud de lineamientos, (b) Mapa de numero de lineamientos, (c) Mapa de numero de intersecciones. Elaboración propia.

5.2.3. Adaptación al contexto del play geotérmico del Sibundoy

Los flujos de agua generalmente están dominados por el control estructural del área. Para conocer los planos donde se orientan las estructuras superficiales y las direcciones preferenciales por donde se puede estar infiltrando el flujo hacia las fuentes termales, fue necesario realizar análisis de las diferentes orientaciones para cada litología con sus respectivas longitudes de persistencia (Shinghal & Gupta, 2010).

Los análisis estructurales de cada litología presentados en la figura 5 evidencian tres direcciones preferenciales; (1) NE-SW observada principalmente en las litologías de edad Jurásica como el Monzogranito de Mocoa y la Formación Saldaña; (2) N-S relacionada principalmente al complejo migmatítico de La Concha – Río Téllez de edad Proterozoica, la Formación Villeta de edad Cretácica y La Cuarzomonzodiorita de sombrerillos de edad Jurásica; (3) ENE-WSW representado por las unidades correspondientes a Basaltos del Sibundoy del Holoceno, Lavas y piroclastos del Neogeno (Figura 4).

Al evaluar la variable de precipitación en función de la zonificación de la infiltración potencial se observan áreas en un rango relativamente uniforme en todas las clasificaciones utilizadas (1-5) y distribuidas espacialmente de valores más bajos en la zona NW a zonas con valores más altos hacia el SE del área de estudio.

La evaluación de la variable de evapotranspiración presenta un comportamiento similar a la variable anterior, con una distribución homogénea en todos los rangos de clasificación, con una ligera predominancia de la valoración alta (4) al W del área de estudio, y una extensión de 129.000 ha que representan el 28% de la distribución espacial. La clasificación muy baja (1) con una extensión de poco más de 45.000 ha representa aproximadamente el 10% de la zona de estudio.

5.1.2. Mapas temáticos de variables físicas

Los datos utilizados para el desarrollo de la infiltración potencial partieron de la recopilación generada por Ramírez (2021), donde se extrajeron los datos tipo “shapefile” con variables como geología, red estructural de la zona y modelo de elevación digital, que integra diferentes fuentes de información (SGC, 2021); (Velandia et al., 2005). Esta base de datos fue complementada con otras variables como tipo de suelos y coberturas vegetales, extraídos del mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (IDEAM, 2017), y el mapa de pendientes generado a partir de un modelo de elevación digital con resolución de 10 x10 metros.

Para la variable de geología las unidades más representativas en cuanto al área son; El Monzogranito de Mocoa ubicado en la zona SE de la zona de estudio con 102.576 ha de extensión, la unidad de Lavas y Piroclastos ubicada en el NW con una extensión de 96.984 ha y la formación Saldaña hacia el SE con dimensiones de 37.620 ha. Al evaluar las unidades geológicas en función de la infiltración predomina la clasificación moderada (2-3) asociada principalmente a basaltos y rocas de características extrusivas que abarcan aproximadamente el 29% del área de estudio. Las valoraciones más bajas se asocian a las cuarzo monzonitas de sobrerillos y otras unidades metamórficas con valoraciones de 1 que abarcan el 28% de la zona, mientras que las unidades cuaternarias de baja consolidación fueron evaluadas con (5) se extienden por poco más de 17 000 hectáreas equivalentes al 4% de la zona de estudio.

En la variable de textura de suelos para la evaluación de la infiltración las zonas con la valoración más baja (1) se encuentran ubicadas en el SE del área de estudio, abarcan un área de aproximadamente 85000 ha, que representa el 19% de la zona de estudio y están asociadas a suelos arcillosos y de poca profundidad, la valoración alta representa aproximadamente un 55% de área de estudio, abarcando 251.485 ha y se localiza distribuida como una franja de NE a SW asociada a clasificaciones de sedimentos no consolidados sin erosión, cenizas volcánicas y suelos orgánicos.

La variable de coberturas vegetales clasificada para la evaluación de las zonas potenciales de infiltración no tiene gran variabilidad en el área de estudio, la clasificación moderada es la que representa mayor área poco más de 300.000 ha localizada por toda el área de estudio pero con mayor concentración hacia el SW, asociadas a coberturas vegetales como, bosque con vegetación secundaria, pastos y herbazales densos, Las variaciones son zonas de

clasificación alta asociadas a zonas atribuidas a coberturas vegetales de pastos y arbustales abiertos principalmente y zonas con clasificación baja ubicadas en la zona SE, NW y alrededor del valle del Sibundoy asociadas a coberturas vegetales de cuerpos de agua superficial y territorio artificializado.

La variable de pendientes en la evaluación de la infiltración potencial da como resultado de zonas más representativas en términos de área, las atribuidas a la clasificación moderada con pendientes de 15°-30° y una extensión de aproximadamente 160.000 ha, que representa un 32% del área de estudio y las zonas con clasificación baja con pendientes de 30°- 45° que abarcan un área de aproximadamente 140.000 ha, representando el 29% de la zona de estudio, las zonas con valoración más alta (4-5) para las zonas potenciales de infiltración corresponden con pendientes en rango de 0°- 15° se encuentran concentradas hacia el SE y alrededor del valle del Sibundoy abarcando aproximadamente 18% y 16% del área de estudio respectivamente.

La variable de densidad de lineamientos evaluada para la zonificación de la infiltración potencial presenta la zona con mayor área la valorada como moderada con una extensión de aproximadamente 220.000 ha, abarcando un 52% del área de estudio, las zonas con menor densidad de lineamientos, valorada bajas o muy bajas se encuentran hacia el SE y alrededor del valle del Sibundoy y representan un 18% y 10% del área de estudio respectivamente.

5.2.3. Zonificación de la infiltración potencial

Las zonas potenciales de infiltración (figura5) se obtuvieron en el software ArcGis v.10.8 mediante la herramienta “álgebra de mapas”, a partir de la ecuación propuesta por Montoya et al. (2019) la cual se basa en la ponderación de los 7 mapas analizados anteriormente a partir de un valor obtenido heurísticamente con el criterio del grupo de trabajo, que permitió la asignación de un porcentaje de peso de una variable respecto a la otra, tal como se muestra en la tabla. Los criterios de evaluación arrojaron un mayor peso para la variable de precipitación con un 28%, seguido de los suelos con un 16%, las pendientes con un 15% y las fallas con un 13% y en menor medida para la geología y la evapotranspiración

La distribución espacial del modelo propuesto presenta una alta correlación de las zonas de mayor potencial de infiltración con las zonas de menores pendientes, tipos de suelos óptimos para la infiltración y la delimitación estructural de la falla de San Francisco-Yungillo hacia el NW, y del sistema de fallas de Conejo hacia el SE.

Las zonas de más baja infiltración potencial se encuentran ubicadas en las zonas SE Y NW del área de estudio, asociadas a las pendientes más altas, menores valores de precipitación y de unidades litológicas con menor grado de fracturamiento como son El Monzogranito de Mocoa hacia el SE y el Complejo Migmatítico de la Cocha- Río Tellez en el NW.

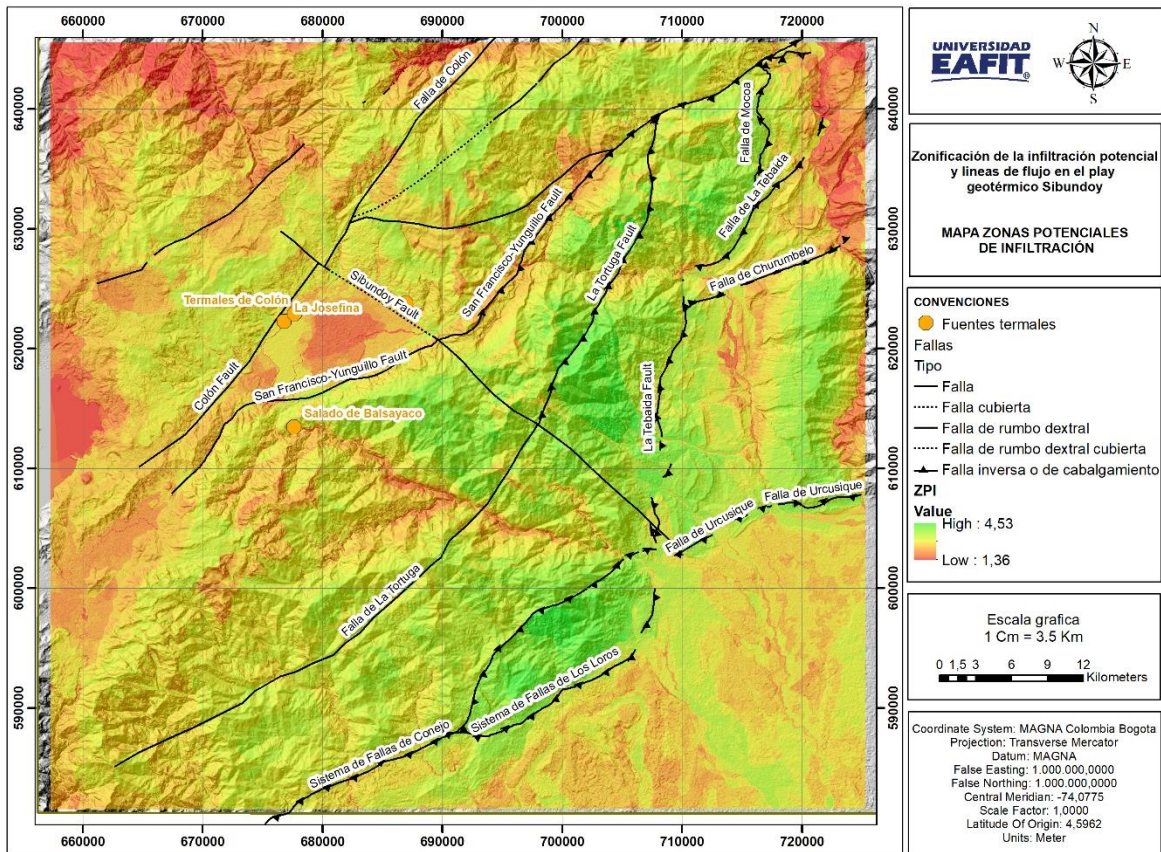


Figura 5. Mapa zonas potenciales de infiltración. Elaboración propia.

6. Discusión

6.1. Control estructural

El Valle de Sibundoy es la principal depresión de la región, originada por la tensión local, y donde el flujo de calor se produce a lo largo de zonas preferenciales de fracturamiento como el sistema de fallas de San Francisco- Yungillo en respuesta a la configuración tectónica propuesta por Velandia et al. (2005). Descrita como una cuenca de tipo pull-apart desarrollada a lo largo de un límite convergente entre las placas de Nazca y Suramérica (Duque-Caro, 1990).

Una característica común en fallas de rumbo es la ocurrencia de fallas y pliegues "escalonados" dentro y adyacentes a la zona de desplazamiento principal, donde comúnmente se observan cinco conjuntos de fracturas: (1) fallas de rumbo sintéticas o cizallas de Riedel (R); (2) fallas de rumbo antitéticas o cizallas de Riedel (R') conjugadas; (3) fallas sintéticas secundarias o cizallas P; (4) fracturas por extensión o tensión (Biddle et al., 1985); y (5) fallas paralelas a la zona de desplazamiento principal (Ramírez & Marín-Cerón, 2021).

Esta configuración puede analizarse a partir de las direcciones preferenciales de fracturamiento de cada unidad litológica que evidencian un registro de los esfuerzos y movimientos ocurridos en la zona y que pueden servir para predecir las direcciones de flujo,

tanto de agua meteórica que alimenta el sistema hidrotermal como el flujo de calor resultante del sistema.

La zona asociada a mayor densidad de fracturamiento corresponde a una faja orientada en sentido NE-SW y delimitada por la falla de San Francisco-Yungillo hacia el NW, y el sistema de fallas de Conejo hacia el SE siendo a su vez correspondiente con la zona de mayor valor de infiltración potencial para el área de estudio. Posiblemente esta zona de mayor fracturamiento e infiltración concentra el flujo hacia la depresión del valle del Sibundoy por medio de los principales sistemas de fallas regionales.

Posiblemente esta faja de mayor densidad de fracturamiento genere polos aproximadamente al NW que producen flujos de agua meteórica que al encontrarse con la fuente de calor produce los procesos de mezcla anteriormente mencionados y encuentran las fallas próximas al depósito del valle del Sibundoy como conductos preferenciales para su retorno a la superficie evidenciados en las cuatro fuentes termales.

En la figura 6 se generó una asociación entre la densidad de lineamientos y las unidades litológicas de la zona, agrupando las mismas en una escala de 4 valores de referencia de menor a mayor densidad de lineamientos por unidad litológica. Los resultados concuerdan con la hipótesis planteada de una zona asociada a mayor densidad de lineamientos asociada a los sistemas de fallas y responsable de los procesos de mezcla.

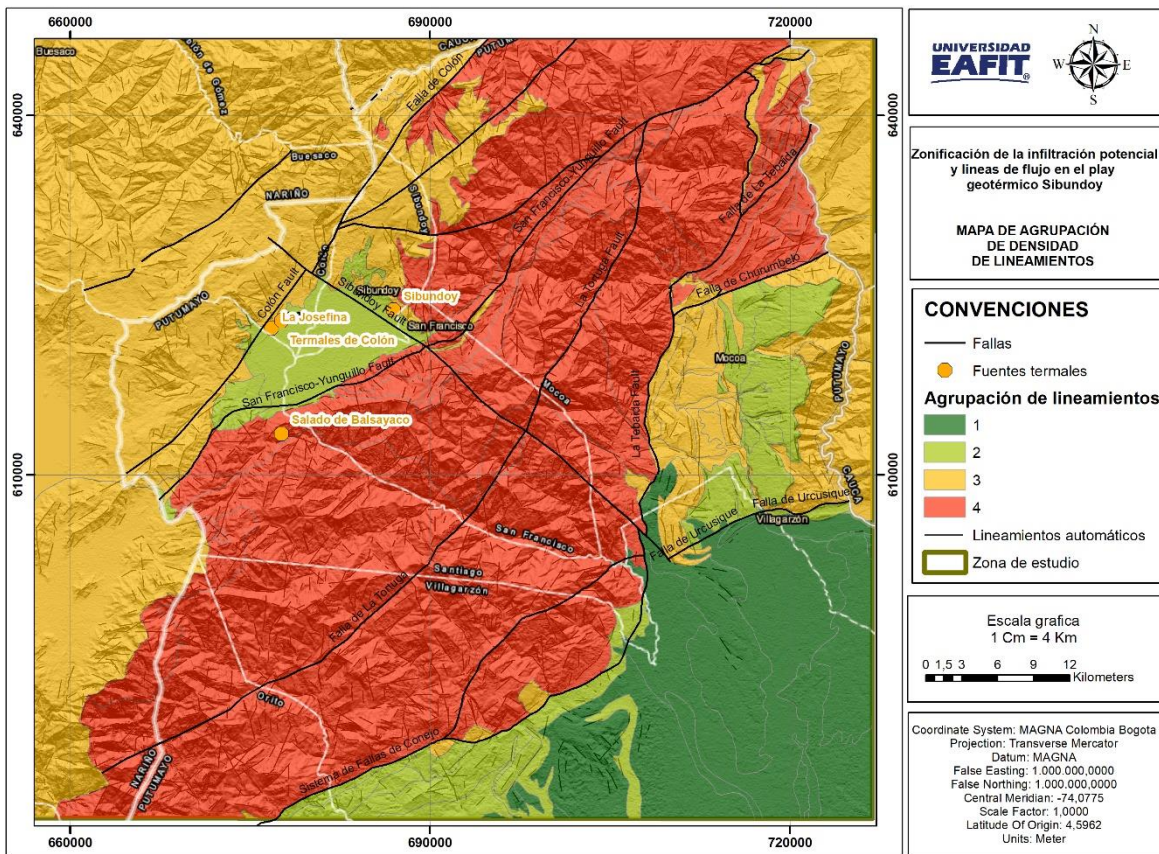


Figura 6. Mapa de agrupación de densidad de lineamientos por unidad litológica. Elaboración propia.

6.2. Análisis de zonificación de la infiltración potencial

Como se menciona con anterioridad a partir del análisis jerárquico realizado, las variables más determinantes para la zonificación potencial de la infiltración son; (1) la precipitación, (2) la densidad de lineamientos y (3) facilidad de los suelos para permitir la infiltración (tabla 2).

La precipitación evidenciada en un alto régimen local derivado de las condiciones climáticas asociadas al inicio de la cuenca amazónica y su configuración orográfica, la densidad de lineamientos que corrobora la tendencia de un marcado control estructural de los sistemas de fallas regionales, que al ser procesadas de manera conjunta imprimen un alto potencial infiltración soportan la hipótesis de un sistema hidrotermal en constante interacción con aguas meteóricas provenientes de una faja orientada NE-SW que alimentan el flujo en dirección NW hacia los depósitos en los cuales se sitúan las 4 fuentes termales.

Para correlacionar de manera efectiva los análisis propuestos a lo largo del documento se generó al igual que la figura anterior una agrupación entre las zonas potenciales de infiltración y las unidades litológicas dando una categorización de bajo, medio y alto potencial de infiltración (Figura 7).

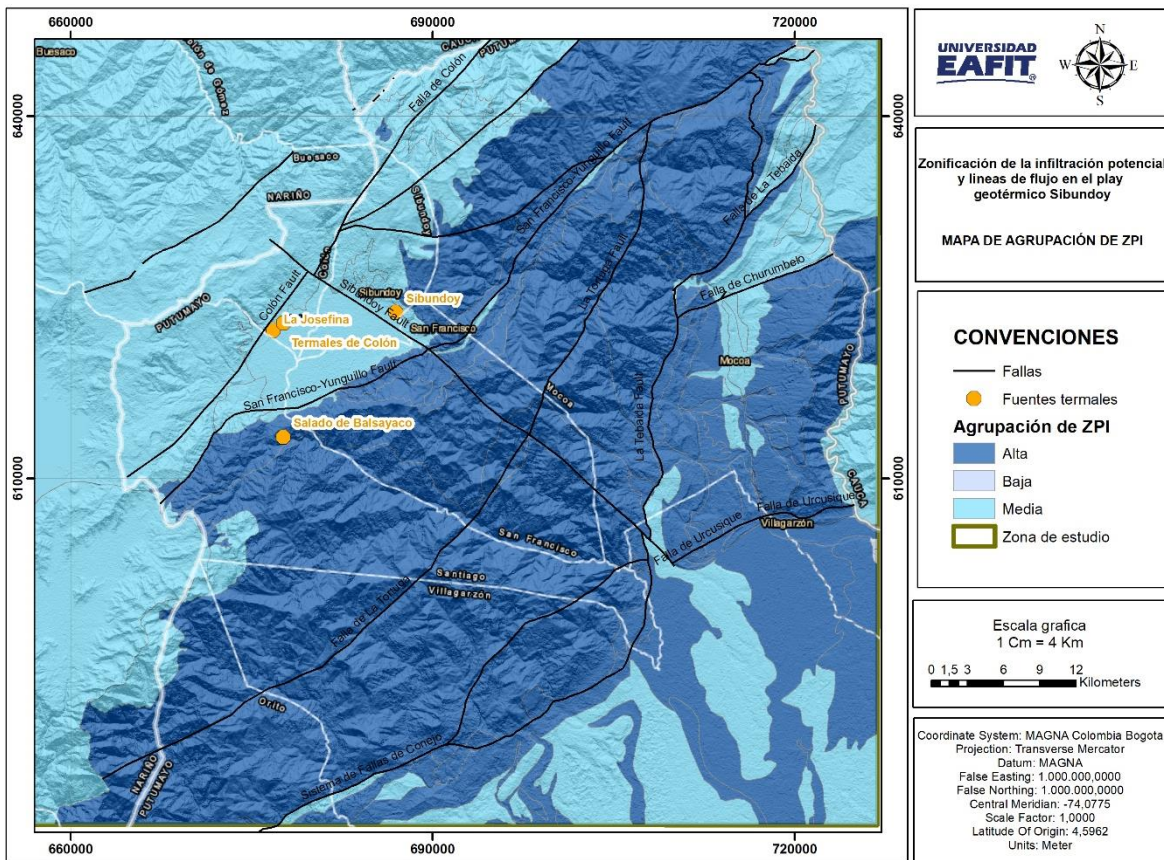


Figura 7. Mapa zonas potenciales de infiltración. Elaboración propia.

6.3. Aporte al modelo conceptual

Retomando lo planteado por Ramírez (2021), se propone un proceso de mezcla entre agua meteórica y el agua de origen termal a partir de relaciones entre isótopos estables que establecen el origen de los fluidos descargados, la mezcla de aguas subterráneas, la interacción agua-roca y los procesos de separación de vapor (Nutti, 1991); (Ramírez & Marín-Cerón, 2021)).

Este proceso de mezcla muestra que el control estructural tiene un papel dominante en el SGSV, y corrobora que la infiltración de aguas meteóricas en los termales del norte presentan temperaturas más bajas que el termal Salado de Balsayaco, gracias a que la advección de las isotermas generadas por el movimiento de la falla de cabalgamiento San Francisco-Yunguillo al SW concentran el flujo tanto de entradas como salidas; demostrando así que la fuente de calor del volcán Sibundoy también está controlada por el Sistema de Fallas de Algeciras. (Figura 8). Esto es importante para definir targets objetivo de futuros estudios y entender la importancia de la configuración tectónica regional, las respuestas estructurales asociadas al mismo y los procesos de interacción con flujos meteóricos en sistemas no convencionales o de características mixtas.

Los datos de geotermómetros propuestos por, Ramírez, (2021). muestran temperaturas del reservorio entre 95 y 80 °C. La diagramación para el modelo conceptual ajustado se presenta en la figura 10 mostrando la diferenciación de la recarga potencial y una aproximación de cómo puede estar ocurriendo el flujo de la mezcla entre aguas meteóricas y termales para el SGSV.

7. Conclusiones

A partir de toda la información secundaria analizada, inferimos que el calor generado por el proceso de subducción es transferido hacia la superficie por los sistemas estructurales controlando la distribución del campo monogenético. El calor proveniente del magmatismo de arco y el control estructural en las zonas de cabalgamiento, permite categorizar el sistema geotérmico como mixto, donde la fuente de calor está asociada al magmatismo propio del campo, pero su circulación y disipación es controlada por las Fallas San Francisco-Yunguillo, Colón y Sibundoy.

Las imágenes ponderadas con soporte estadístico capturan de manera adecuada la respuesta del terreno ante los esfuerzos regionales. Al realizar el análisis estructural es altamente correlacionable con las tendencias estructurales de la zona en coherencia con la configuración tectónica propuesta por Velandia (2005) , y permite distribuir los resultados en términos de densidad de fracturamiento.

Las zonas de mayor fracturamiento se ubican al SE de la Falla San Francisco, mientras que las de menor densidad se ubican sobre las formaciones volcánicas al NW de la falla Colón. Esta tendencia se correlaciona directamente con las zonas de mayor potencial de infiltración asociadas a la Fm Saldaña, permitiendo validar el alto control de la densidad de fracturamiento en los procesos de mezcla.

Los resultados conjugados de los tres objetivos específicos permiten validar la hipótesis de un sistema geotérmico donde la transferencia de calor se da a lo largo de los sistemas de falla San Francisco, Sibundoy y Colón. En ese sentido la zonificación potencial de la infiltración en la región permite entender la mezcla de agua (meteórica/hidrotermal) en función de la densidad de fracturamiento, para el flujo de agua regional hacia el bloque 1 definido por la zona ubicada al occidente de la falla de San Francisco y catalogado a partir de los termales Josefina, Sibundoy y Colon como el bloque de baja entalpía y el flujo de calor hacia el bloque 2 definido por la zona al oriente de la falla de San Francisco y catalogado a partir del termal Salado del Balsayaco como el bloque de media entalpía, debido a a advección de las isotermas hacia el bloque que cabalgante.

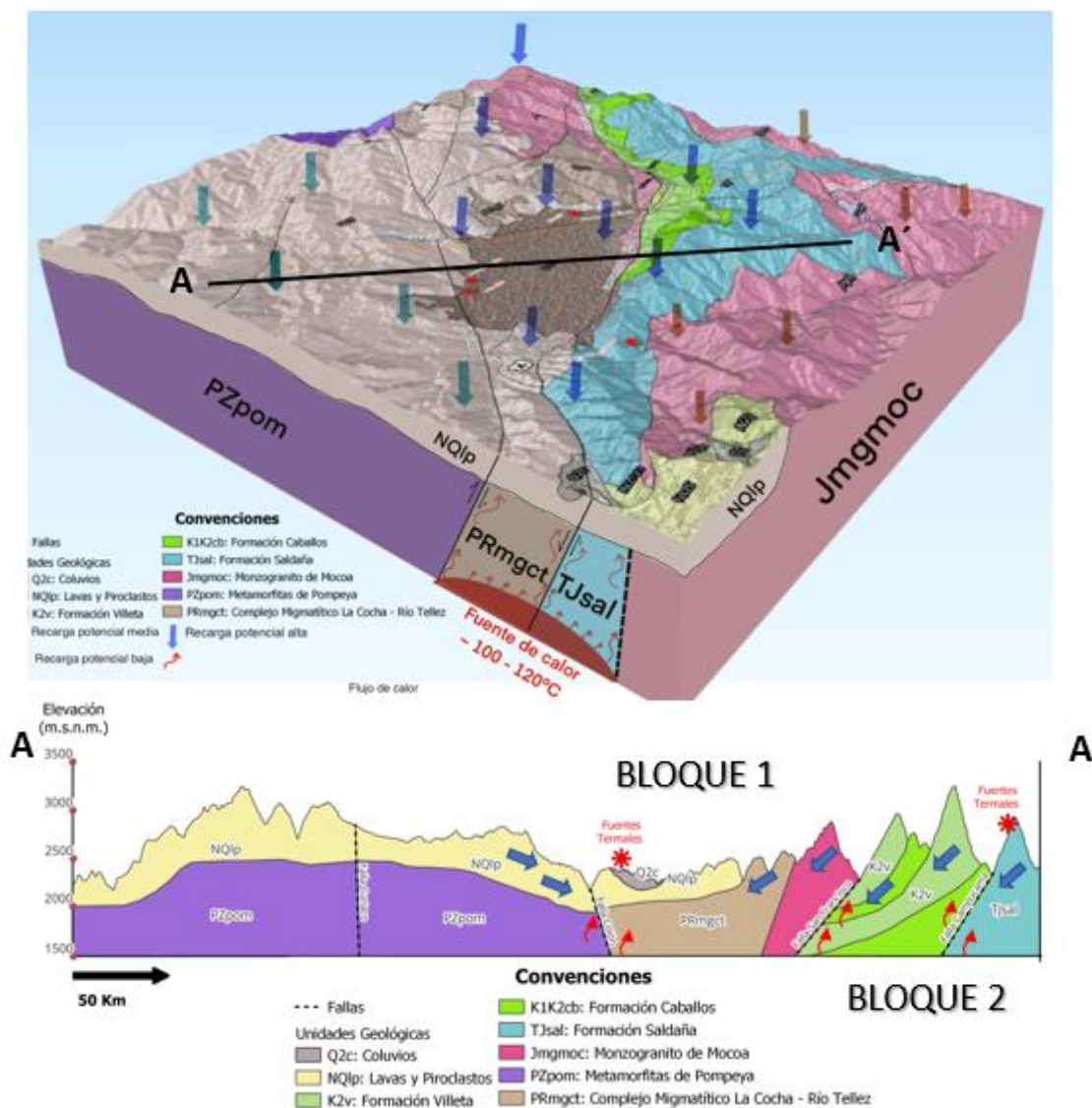


Figura 8. Modelo conceptual SGSV. Elaboración propia a partir de (Ramirez & Marín-Cerón, 2021) y (SGC, 2021)

8. Bibliografía

- Baston, R., Edwards, E., & Eliason, E. (1975). *Computer generated shaded relief images*. *J. Res US. Geol. Surv.* 3 (4), [401-408].
- Biddle, K., & Christie Blick, N. (1985). *Basin formation. structural traps, and controls on hydrocarbon occurrence along wrenchfault zones: Offshore Technology*. Conference Paper OTC 4872, 291- 295.
- Coolbaugh. (2004). *A method for estimating undiscovered geothermal resources in Nevada and the Great Basin*. Geoth. Resour. Counc. Trans.
- CORPOAMAZONIA. (2006). *Plan de manejo ambiental de los humedales de la parte plana del valle del Sibundoy*.
- Haeruddin Haeruddin, Saepuloh Asep, Mohamad Nur Heriawan, Taiki Kubo, Katsuaki Koike, & Dwiyoarani Malik. (2017). *Application of lineament density extracted from dual orbit of synthetic aperture radar (SAR) images to detecting fluids paths in the Wayang Windu geothermal field (West Java, Indonesia)*. Volume 72, March 2018, Pages [145-155].
- Holdridge, L. R. (1979). *Ecología basada en zonas de vida*. IICA.
- Horn, B. (1981). *Hill shading and reflectance map*. Proc. IEEE 69 (1), [14-47].
- IDEAM. (2010). *Sistemas Morfogénicos del Territorio Colombiano, Escala 1:500.000*. Bogotá D.C: PUBLICACIONES INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. 252 p.
- IDEAM. (2017). *Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia, Escala 1:100.000*.
- Marin-Cerón, M. I., Bernet, M., & Leal Mejia, H. (2019). *Late Cenozoic to Modern-Day Volcanism in the Northern Andes: A. Geology and Tectonics of Northwestern South America* [PP 603–648].
- Mark, R. (1992). *Multidirectional, oblique-weighted, shaded-relief image of the Island*. U.S. Geological Survey.
- Moeck, I. (2014). *Catalog of geothermal play types based on geologic controls*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37 (2014) [867–882].
- Monsalve Bustamante, M. L., Gómez, J., & Nuñez Tello, A. (2020). *Rear-arc small-volume basaltic volcanism in Colombia: Monogenetic volcanic fields*. *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, [353-396].
- Montoya Londoño, N., & Parra Londoño, M. C. (2019). *Preliminary geothermal conceptual model*. (Trabajo de grado- Universidad EAFIT).
- Nuñez, A. (2003). *Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco Departamentos de Caquetá, Cauca, Huila, Nariño y Putumayo Escala 1:100.000 Memoria Explicativa*. Ingeominas, pp [92-98].

- Nuti, S. (1991). *Isotopic techniques in geothermal studies*. In: F. D'Amore (Ed.) . Applications of geochemistry in geothermal reservoir development, 215-250. .
- Pedraza Garcia , P., Vargas, C., & Monsalve, H. (2007). *Geometric Model of the Nazca Plate Subduction*. Earth Sci Res J 11(2):117–130.
- Radaideh, Omar, M., Grasemann, Bernhard, Melichar, Rostislav, & Mosar. (2016). *Detection and analysis of morphotectonic features utilizing satellite remote sensing and GIS*. . Revista Geomorphology 275 [p.58–79].
- Ramirez, C., & Marín-Cerón, M. I. (2021). *Preliminary geothermal conceptual model at the Sibundoy geothermal play, SW Colombian volcanic arc. A conventional or non-conventional geothermal play?* Medellín: [Tesis de grado] - Departamento de Ciencias de la Tierra- Universidad EAFIT.
- Restrepo, M., Bustamante, C., Cardona, A., & Beltran Triviño, A. (2021). *Tectonic implications of the jurassic magmatism and the metamorphic record at the southern Colombian Andes*. Journal of South American.
- SGC. (2021). *Geología y geoquímica de la plancha 430 - Mocoa. Escala 1:100.000*.
- Shinghal, B., & Gupta, R. (2010). *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*.
- Smith, I., & Németh, K. (2017). *Source to surface model of monogenetic volcanism: a critical review*. Geological society publications.
- Stelling, P., Shevenell, L., Hinz, N., Coolbaugh, M., Melosh, G., & Cuming, W. (2016). *Geothermal systems in volcanic arcs: Volcanic characteristics and surface manifestations as indicators of geothermal potential and favorability worldwide*. Journal of Volcanology and Geothermal Research : VOLGEO 586.
- Velandia , F., Acosta, J., Terraza Melo, R., & Villegas, H. (2005). *The current tectonic motion of the Northern Andes along the Algeciras Fault System in SW Colombia*. Tectonophysics 399(1-4) [313-329].
- W.R. Benoit, e. a. (1982). *Discovery and Geology of the Desert Peak Geothermal Field: A Case History*.