

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE LAS ZONAS DE RIO BLANCO-
SOTARÁ Y PURACÉ A PARTIR DE INFORMACIÓN SECUNDARIA**



**Universidad
del Cauca**

Juan Sebastián Muñoz Benítez

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

Director:

Ing. Lucio Gerardo Cruz Velasco

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Civil

Programa de Ingeniería Civil

Popayán

2025

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que fueron parte fundamental en la culminación de este proyecto y en mi formación profesional.

En primer lugar, a mi madre Betty Alicia y a Tony, por su apoyo incondicional, por creer en mí en cada paso de este camino y por brindarme siempre su amor, comprensión y fortaleza. Sin su respaldo constante, este logro no habría sido posible.

A mis hermanas, María y Luisa, gracias por sus palabras de aliento, por estar presentes en los momentos difíciles y por motivarme a seguir adelante a pesar de las adversidades. Su confianza en mí fue un impulso clave para no rendirme.

Al ingeniero Lucio, por su valiosa guía y por despertar en mí el interés por un área del conocimiento que representó un gran reto, pero también una gran oportunidad de crecimiento personal y académico. Su motivación fue esencial para atreverme a explorar nuevos horizontes.

Y, por supuesto, gracias a Dios, a la vida y a mis amigos por brindarme la fuerza, la salud y las oportunidades para llegar hasta aquí. Este logro es también un reflejo de fe, perseverancia y gratitud por cada paso recorrido.

Con todo mi corazón, gracias.

Juan Sebastián Muñoz Benítez

Contenido

Resumen	1
1. Introducción	2
1.1. Justificación.....	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.3. Hipótesis.....	4
1.4. Metodología	4
2. Marco teórico	6
2.1. Geotermia	6
2.2. Recursos y yacimientos geotérmicos	7
2.3. Clasificación de los yacimientos geotérmicos	9
2.4. Usos de la Geotermia	12
2.5. Investigación de recursos geotérmicos – Favorabilidad geotérmica.....	13
3. Descripción y reconocimiento del área de estudio.....	15
3.1. Contexto geodinámico.....	16
3.2. Rasgos morfológicos	18
3.2.1. Rasgos morfológicos en el municipio de Puracé	20
3.2.2. Rasgos morfológicos en el municipio de Sotará	22
3.2.3. Sistemas geotermiales definidos a partir de la morfología.....	24

3.3.	Marco geológico.....	25
3.3.1.	Marco geológico del municipio de Puracé.....	25
3.3.2.	Margo geológico del municipio de Sotará	27
3.4.	Marco estructural.....	30
3.4.1.	Marco estructural del municipio de Puracé.....	30
3.4.2.	Marco estructural del municipio de Sotará	31
3.5.	Marco volcanológico.....	32
3.5.1.	Marco volcanológico en el municipio de Puracé	32
3.5.2.	Marco volcanológico en el municipio de Sotará.....	33
4.	Procesamiento y análisis de la información disponible	35
4.1.	Unidades Geológicas.....	35
4.1.1.	Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé	35
4.1.2.	Unidades geológicas presentes en el municipio de Sotará.....	38
4.2.	Estructuras geológicas.....	42
4.2.1.	Estructuras geológicas en el municipio de Puracé	42
4.2.2.	Estructuras geológicas en el municipio de Sotará.....	44
4.3.	Volcanismo cuaternario	46
4.3.1.	Volcanismo cuaternario en el municipio de Puracé.....	46
4.3.2.	Volcanismo cuaternario en el municipio de Sotará	48
4.4.	Geoquímica de manifestaciones termales	51
4.4.1.	Geoquímica de manifestaciones termales en el municipio de Puracé.....	51
4.4.2.	Geoquímica de manifestaciones termales en el municipio de Sotará	55

5. Procesamiento y análisis de variables geotérmicas, cálculo y obtención de la favorabilidad geotérmica	57
5.1. Consideraciones generales	57
5.2. Análisis de los recursos geotérmicos en el municipio de Puracé	60
5.2.1. Geoquímica de manifestaciones termales en superficie.....	60
5.2.2. Geología del municipio de Puracé	62
5.2.3. Estructuras geológicas en el municipio de Puracé	66
5.2.4. Volcanismo cuaternario en el municipio de Puracé.....	68
5.2.5. Mapa de favorabilidad geotérmica y zonas de interés en el municipio de Puracé	70
5.3. Análisis de los recursos geotérmicos en el municipio de Sotaró.....	72
5.3.1. Geoquímica de manifestaciones termales en el municipio de Sotaró	72
5.3.2. Geología en el municipio de Sotaró	74
5.3.3. Estructuras geológicas en el municipio de Sotaró.....	79
5.3.4. Volcanismo cuaternario en el municipio de Sotaró	81
5.3.5. Mapa de favorabilidad geotérmica y zonas de interés en el municipio de Sotaró	85
6. Análisis de resultados y discusión.....	87
7. Conclusiones	89
8. Referencias	91

Tablas

Tabla 1. Unidades geomorfológicas presentes en la plancha 365 (Coconuco).....	21
Tabla 2. Unidades geomorfológicas presentes en el municipio de Sotará.....	22
Tabla 3. Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé.....	35
Tabla 4. Unidades geológicas presentes en el municipio de Sotará.....	38
Tabla 5. Estructuras geológicas presentes en el municipio de Puracé.....	42
Tabla 6. Estructuras geológicas presentes en el municipio de Sotará.....	44
Tabla 7. Unidades volcánicas recientes en el municipio de Puracé.....	46
Tabla 8. Unidades volcánicas recientes en el municipio de Puracé.....	48
Tabla 9. Temperaturas profundas obtenidas a partir de geotermómetros de sílice para los manantiales del municipio de Puracé.....	54
Tabla 10. Temperaturas profundas obtenidas a partir de geotermómetros alcalinos para los manantiales del municipio de Puracé.....	54
Tabla 11. Criterios de favorabilidad geológica.....	58
Tabla 12. Criterios de favorabilidad estructural.....	58
Tabla 13. Criterios de favorabilidad volcanológica.....	59
Tabla 14. Factores de ponderación para los parámetros de favorabilidad.....	59
Tabla 15. Temperatura profunda estimada para los manantiales termales del municipio de Puracé.....	60
Tabla 16. Clasificación de las unidades geológicas del municipio de Puracé con base en los criterios de favorabilidad geológica.....	62
Tabla 17. Clasificación de las estructuras geológicas del municipio de Puracé con base en los criterios de favorabilidad estructural.....	66

Tabla 18. Clasificación de las unidades volcánicas recientes del municipio de Puracé con base en los criterios de favorabilidad de volcanismo cuaternario.68

Tabla 19. Clasificación de las unidades geológicas del municipio de Sotaró con base en los criterios de favorabilidad geológica.74

Tabla 20. Clasificación de las estructuras geológicas del municipio de Sotaró con base en los criterios de favorabilidad estructural.79

Tabla 21. Clasificación de las unidades volcánicas recientes del municipio de Sotaró con base en los criterios de favorabilidad de volcanismo cuaternario.81

Figura 1. Esquema de un yacimiento geotérmico convencional.	8
Figura 2. Localización de los municipios de Sotará (izq) y Puracé (der) en el departamento del Cauca.	15
Figura 3. Mapa de fallas y configuración tectónica del Bloque de los Andes del Norte.	18
Figura 4. Unidades geomorfológicas mayores en el departamento del Cauca.....	20
Figura 5. Mapa de unidades geomorfológicas de la plancha 365 (Coconuco).....	21
Figura 6. Mapa de distribución de subunidades geomorfológicas en el municipio de Sotará.	24
Figura 7. Estratigrafía generalizada de la plancha 365 Coconuco.	26
Figura 8. Columna estratigráfica del municipio de Sotará.	29
Figura 9. Distribución de las unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé.....	37
Figura 10. Distribución de las unidades geológicas presentes en el municipio de Sotará.	41
Figura 11. Distribución de las estructuras geológicas presentes en el municipio de Puracé.	43
Figura 12. Distribución de las estructuras geológicas presentes en el municipio de Sotará.	45
Figura 13. Distribución de las unidades volcánicas recientes en el municipio de Puracé.....	47
Figura 14. Distribución de las unidades volcánicas recientes en el municipio de Sotará.	50
Figura 15. Agrupamiento de los manantiales termales asociados al sistema volcánico de Puracé, con base en las subcuencas hidrográficas en las que se ubican.	52
Figura 16. Distribución de los manantiales termales asociados al sistema volcánico de Puracé.	53
Figura 17. Distribución de los manantiales termales asociados al sistema volcánico de Sotará.	56
Figura 18. Mapa de favorabilidad geoquímica generado a partir de la interpolación de las temperaturas profundas promedio para las manifestaciones termales del municipio de Puracé....	61

Figura 19. Mapa de favorabilidad geológica generado a partir de las unidades geológicas del municipio de Puracé.	66
Figura 20. Mapa de favorabilidad estructural generado a partir de las estructuras geológicas del municipio de Puracé.	67
Figura 21. Mapa de favorabilidad volcanológica generado a partir de las unidades volcánicas cuaternarias del municipio de Puracé.	69
Figura 22. Mapa de favorabilidad geotérmica generado a partir de la ponderación de los mapas de favorabilidad anteriores del municipio de Puracé.	71
Figura 23. Mapa de favorabilidad geoquímica generado a partir de la interpolación de las temperaturas profundas para las fuentes termales del municipio de Sotará.	73
Figura 24. Mapa de favorabilidad geológica generado a partir de las unidades geológicas del municipio de Sotará.	78
Figura 25. Mapa de favorabilidad estructural generado a partir de las estructuras geológicas del municipio de Sotará.	80
Figura 26. Mapa de favorabilidad volcanológica (derecha) generado a partir de las unidades volcánicas cuaternarias del municipio de Sotará (izquierda).	84
Figura 27. Mapa de favorabilidad geotérmica (derecha) generado a partir de la ponderación de los mapas de favorabilidad anteriores del municipio de Sotará (izquierda).	86

Aclaración de la autoría

Este trabajo de grado es en desarrollo de una idea de investigación del Profesor Lucio Cruz y su dirección, la autoría pertenece tanto al profesor Lucio Cruz, como al desarrollador del trabajo de grado.

También me comprometo a manejar la información de manera confidencial y responsable.

ESTUDIANTE: Juan Sebastián Muñoz Benítez

CODIGO: 100414010900

Resumen

Se realizó una evaluación del potencial geotérmico de los municipios de Puracé y Sotará (Cauca, Colombia), con base en información secundaria e integrando parámetros clave como geoquímica de manantiales termales, unidades geológicas, estructuras geológicas y volcanismo reciente. A partir de la metodología propuesta por Aguilera et al. (2014), se generaron mapas de favorabilidad geotérmica mediante análisis espacial asignando un factor de ponderación para cada parámetro (geoquímica: 40 %, estructuras: 30 %, geología: 20 %, volcanismo: 10 %). Según Alfaro (2013), en el municipio de Puracé, los manantiales termales revelan temperaturas de reservorio entre 212 °C y 229 °C, propias de un sistema de alta entalpía, y en el municipio de Sotará, el manantial Las Amarillas indica una temperatura de 177 °C, lo que sugiere un sistema de media-alta entalpía. Las estructuras geológicas, especialmente la falla regional de San Jerónimo, ofrecen condiciones favorables para la circulación de fluidos profundos. Las unidades volcano-sedimentarias cenozoicas también aportan alta favorabilidad, al igual que los depósitos volcánicos cuaternarios cercanos a los volcanes activos. Los resultados permitieron delimitar zonas con potencial geotérmico alto, particularmente al occidente de Puracé y al oriente de Sotará. Estos resultados se proponen como base para orientar futuras campañas de exploración geotérmica y como material para divulgación con las comunidades. Finalmente, se resalta la necesidad de validar esta evaluación con trabajo de campo, caracterización de nuevas fuentes termales y mayor detalle de las unidades y estructuras geológicas.

1. Introducción

Los municipios de Puracé y Sotará, ubicados en el departamento del Cauca, presentan características geológicas y volcánicas que sugieren la presencia de sistemas geotérmicos de interés. Sin embargo, la exploración y el desarrollo de estos recursos requieren estudios detallados que permitan evaluar la favorabilidad geotérmica de la región. Estas áreas se encuentran en zonas de influencia de sistemas volcánicos con actividad reciente, lo cual se puede evidenciar por la existencia de unidades volcánicas que tienen una gran extensión en estos territorios. Con base en la información recopilada, fue posible plantear, tanto para el municipio de Puracé como para el municipio de Sotará, sistemas geotérmicos de media/alta entalpía, caracterizadas por la existencia de fuentes magmáticas que alimentan el volcanismo actual.

Este trabajo de investigación se enfocó en la generación de mapas de favorabilidad geotérmica para los municipios mencionados, con el objetivo de identificar las áreas con mayor potencial de existencia del recurso geotérmico. Para ello, se empleó información secundaria, es decir, datos preexistentes provenientes de estudios previos realizados en las áreas de interés y que son de acceso público. La integración y análisis de esta información permitió desarrollar un modelo de evaluación basado en cuatro parámetros fundamentales: la geoquímica de los manantiales termales, las unidades geológicas presentes en la zona, las estructuras geológicas y la presencia de depósitos volcánicos recientes.

1.1. Justificación

Los combustibles fósiles representan el principal sistema de generación de energía en el mundo, pero actualmente esta situación se está replanteando ya que materias como el petróleo, gas o el carbón son recursos limitados, además de que su uso a gran escala está generando graves afectaciones al medio ambiente (National Geographic, 2023). Debido a esto, nos encontramos ante la necesidad de implementar nuevos métodos no contaminantes tanto para la generación de energía eléctrica, como para el aprovechamiento directo del calor. En este contexto, la geotermia aparece como una alternativa a esta necesidad, siendo una fuente de energía renovable, limpia y amigable con el medio ambiente (Montclair State University, n.d.).

La ubicación geográfica de Colombia la sitúa como uno de los países con potencial para el aprovechamiento de la energía geotérmica (Jorquera, 2021), por cual es importante avanzar en la investigación de este recurso, con el fin de poder avanzar hacia una transición energética que permita disminuir el consumo de energías procedentes de combustibles fósiles, y generar una matriz energética con mayor participación de fuentes de energía limpias y renovables.

Con el fin de aportar hacia el avance en la investigación de los recursos geotérmicos en el país, se plantea en este proyecto la realización de un mapa de favorabilidad geotérmica en el área de influencia del volcán Sotará y el volcán Puracé, sirviendo como punto de partida para definir zonas específicas de interés para la posterior realización estudios específicos en una siguiente etapa de la exploración.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar mapas de favorabilidad geotérmica para las áreas de influencia de los municipios de Sotará y Puracé, con base en información secundaria de estudios realizados en la zona del área de influencia del Volcán Sotará y del Volcán Puracé.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar un reconocimiento de los manantiales termales dentro del área de estudio, a partir de información secundaria.
- Identificar y generar un mapa para cada una de las dos áreas propuestas con potencial geotérmico a nivel sub-regional.
- Priorizar áreas con potencial para realizar estudios de detalle.

1.3. Hipótesis

Es posible plantear un mapa de favorabilidad del sistema geotérmico en la zona de influencia de Rio Blanco – Sotará y Puracé, con base en información secundaria (unidades geológicas, fallas, fuentes termales superficiales, alteraciones hidrotermales, etc), en la cual la fuente de calor está asociada a intrusiones calientes o al magma, además el flujo de agua está controlado por las fracturas permeables y zonas de falla. Estas variables pueden cambiar según la disponibilidad y confiabilidad de la información recopilada durante el desarrollo de la investigación.

1.4. Metodología

La evaluación de los recursos geotérmicos en los municipios de Puracé y Sotará se realizó con base en la metodología propuesta en Aguilera et al. (2014) y usando únicamente información secundaria, es decir, de estudios existentes en las zonas de interés y que son de carácter público.

En primer lugar, se efectuó la recopilación de toda la información disponible de las zonas, principalmente de carácter geocientífico, y dando prioridad a la información digitalizada.

Posteriormente, se procedió a extraer, clasificar y digitalizar la información relevante para el análisis de los recursos geotérmicos en sistemas de media – alta entalpía que corresponde, según Aguilera et al. (2014), a información de unidades geológicas, estructuras geológicas, geoquímica de manantiales termales y unidades volcánicas recientes.

Finalmente, a la información de cada uno de los parámetros se le asignó un grado de favorabilidad, obteniendo mapas de favorabilidad de carácter geológico, estructural, geoquímico y volcanológico para cada uno de los municipios, y a partir de estos mapas se realizó una suma ponderada según el criterio propuesto por Aguilera et al. (2014), obteniendo un mapa de favorabilidad general para cada una de las zonas de estudio. El procesamiento de los datos y la generación de los mapas de favorabilidad fueron realizados mediante el software ArcGIS 10.

2. Marco teórico

2.1. Geotermia

A continuación, se muestra la descripción que se realiza en Llopis & Rodrigo (n.d.) acerca de algunos conceptos importantes para entender lo que es la geotermia, entendiendo las fuentes de las cuales se origina el calor al interior del planeta:

Geotermia es una palabra de origen griego, derivada de “Geos” que significa tierra, y “Thermos” que significa calor, es decir, geotermia es “calor de la tierra”. Se refiere a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta y al conjunto de técnicas industriales que se aplican para la explotación de este recurso, que se usa para la generación de energía eléctrica o como fuente de calor aprovechable para el ser humano.

La Tierra está constituida, desde el centro hasta la superficie, por tres capas sucesivas de temperaturas decrecientes: núcleo, manto y corteza

- El núcleo está compuesto por un núcleo interno (sólido) y un núcleo externo (líquido), puede alcanzar temperaturas de 4.200 °C. Tiene un espesor de 3.486 km aproximadamente.
- El manto se divide en manto inferior (denso y caliente, de comportamiento plástico) y manto superior (más frío y sólido), posee temperaturas entre los 1.000 y 3.000 °C. Su espesor es de aproximadamente 2.900 km
- La corteza es la capa más superficial. Su temperatura puede variar entre los 1.000 °C en su interior, hasta 15-20 °C en superficie. Su espesor varía entre 5 y 20 km en corteza oceánica y entre 30 y 70 km en corteza continental.

A partir de esta estructura, podemos observar que aproximadamente el 99% de la masa terrestre está sometida a temperaturas superiores a los 1.000 °C, y sólo un 0.1% posee

temperaturas inferiores a los 100 °C. La variación de la temperatura en las diferentes capas del interior de la tierra es a lo que se le conoce como “gradiente geotérmico”. El gradiente geotérmico observado en la mayor parte del planeta es de unos 25 a 30 °C/km, es decir que a medida que descendemos 1 km de profundidad hacia el interior de la Tierra, la temperatura aumenta entre 25 y 30 °C.

El calor interior del planeta puede darse como consecuencia de:

- La desintegración de isótopos radiactivos presentes en la corteza y el manto (Uranio 238, Uranio 235, Torio 232 y Potasio 40).
- El calor inicial generado durante la formación del planeta hace aproximadamente 4.500 millones de años.
- Los movimientos diferenciales entre las diferentes capas que constituyen la Tierra, principalmente el manto y el núcleo.
- La cristalización del núcleo externo y la liberación de energía constantemente por parte del núcleo interno.

Como podemos observar, son muchas las formas en las cuales se puede generar calor en el interior de la Tierra, de las que se produce una cantidad de energía inmensa, y la cual solo es aprovechable una pequeña porción por parte del ser humano.

2.2. Recursos y yacimientos geotérmicos

El recurso geotérmico se refiere la fracción de calor interno del planeta que es aprovechable para el ser humano. Sin embargo, para que esta energía pueda ser aprovechada, es necesario que se acumule en algún cuerpo en el interior de la corteza. La forma más común de concentración de energía en la corteza es en el agua que rellena los poros y fisuras que se encuentran en las formaciones rocosas, la cual actúa como captador y transmisor de la energía geotérmica.

El agua que se encuentra contenida en algunos materiales geológicos permeables adquiere los niveles energéticos (presión y temperatura) que le son transferidas desde el interior de la Tierra. Debido a esto, se producen unas condiciones termodinámicas en el sistema agua-roca que a su vez hacen que el agua adquiera unas características químicas específicas determinadas por un equilibrio de las propiedades fisicoquímicas al interior de la corteza, enriqueciéndola de sales minerales provenientes de la disolución de la roca que le alberga. De tal manera que, el agua cargada en sales minerales, en condiciones de presión y temperatura adecuadas, sirve como vehículo de transporte de la energía proveniente del subsuelo.

Cuando se dan las condiciones adecuadas en los materiales geológicos permeables que contienen agua, para que intercepten con el calor interno del planeta, y que a su vez estos materiales se encuentren lo suficientemente sellados en su parte interior y superior, para evitar el escape del fluido contenido en el sistema, se dan las circunstancias favorables para la existencia de un yacimiento geotérmico.

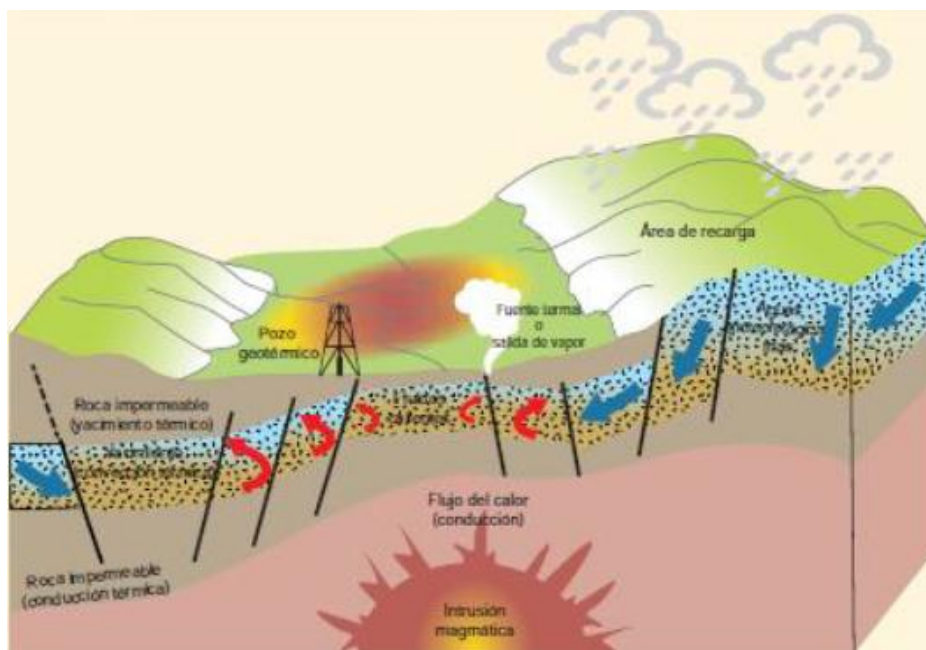


Figura 1. Esquema de un yacimiento geotérmico convencional.

Fuente: Coronado & Garcíadiego (2015).

En la Figura 1, podemos observar un esquema convencional de yacimiento geotérmico, en el cual se representan las condiciones necesarias que se deben presentar para la existencia de éste, las cuales son:

- Foco de calor activo, o lo que es lo mismo, estar situado en áreas inestables de la corteza, con flujos anómalos de calor.
- Roca almacén permeable: existencia a profundidad adecuada (1.5 -2 kilómetros) de rocas permeables que permiten la circulación de fluidos capaces de extraer el calor de la roca.
- Cobertura impermeable: existencia de rocas impermeables que actúan de sello o cierre de los fluidos contenidos en la roca almacén, de manera que se evite la disipación continua de la energía en cantidades importantes (en general existen pequeños escapes de fluido a la superficie que dan origen a los indicios de existencia del yacimiento: geiser, fumarola, solfatara, fuente termal, etc.).

2.3. Clasificación de los yacimientos geotérmicos

Los yacimientos geotérmicos se pueden clasificar según distintos criterios: El contexto geológico, el nivel de temperatura, el modo de explotación y el tipo de utilización (Llopis & Rodrigo, n.d.).

En Coronado & Garcíadiego (2015) se clasifican los sistemas geotérmicos, según la naturaleza de los sistemas geológicos a los que están asociados, de la siguiente manera:

Como ya se ha mencionado anteriormente se requieren ciertas características para que un campo geotérmico sea aprovechado, es primordial conocer la naturaleza del recurso geotérmico de acuerdo con la fuente de calor, para ello se han clasificado los recursos geotérmicos con base a:

- Tipo de transferencia de calor

- Temperatura del yacimiento
- Estado físico
- Utilización y escenario geológico

Cuando se les define de acuerdo con la naturaleza del sistema geológico del que se originan, se categorizan de acuerdo con experiencias de algunos autores (Saemundsson, Axelsson y Steingrímsson 2011).

- Sistemas geotérmicos volcánicos: están asociados a la actividad volcánica.

La fuente de calor para tales sistemas son las intrusiones calientes o el magma. Con mayor frecuencia se les sitúa dentro o cerca de complejos volcánicos, tales como calderas, la mayoría en los límites de las placas, pero algunas en áreas de zonas calientes. En los sistemas volcánicos, son principalmente fracturas permeables y zonas de fallas las que controlan el flujo de agua.

- Sistemas convectivos de fracturas controladas: la fuente de calor es la corteza caliente a profundidad en las áreas tectónicamente activas, con flujo de calor por encima del promedio ($> 30\text{ }^{\circ}\text{C/km}$). Aquí el agua geotérmica ha circulado hasta una profundidad considerable ($> 1\text{ km}$), la mayoría a través de fracturas verticales, para “cosechar” el calor de las rocas.

- Sistemas geotérmicos sedimentarios: se encuentran en muchas de las principales cuencas sedimentarias del mundo. Estos sistemas le deben su existencia a la formación de capas sedimentarias permeables a grandes profundidades ($> 1\text{ km}$) y gradientes geotérmicos arriba del promedio ($> 30\text{ }^{\circ}\text{C/km}$). Estos sistemas son conductivos en naturaleza más bien que convectivos, aun cuando las fracturas y fallas desempeñen un papel en algunos casos. Algunos sistemas convectivos (tal como sistemas convectivos de fracturas controladas) pueden, sin embargo, estar arraigados en rocas sedimentarias.

- Sistemas geopresurizados: son análogos a yacimientos de petróleo y gas geopresurizados en los que el fluido atrapado en trampas estratigráficas puede tener presiones cercanas a los valores litostáticos. Tales sistemas son por lo general bastante profundos.

- Sistemas geotérmicos de roca seca caliente (HDR) o mejorados (con diseño de ingeniería) (EGS): consisten en volúmenes de roca que se han calentado mediante volcanismo o flujo de calor.

IDAE & IGME (2008) clasifican los yacimientos geotérmicos de acuerdo con el nivel energético que albergan como se muestra a continuación:

Los yacimientos convencionales se clasifican de acuerdo con los niveles de energía de los recursos que albergan, es decir, de los fluidos que contiene. por lo tanto, se pueden clasificar en:

- Yacimientos de alta entalpía en los que se cumplen las condiciones clásicas de existencia de un yacimiento y el foco de calor permite que el fluido se encuentre en condiciones de presión y alta temperatura (superior al menos a los 150°C). Las características termodinámicas del fluido permiten su aprovechamiento para producción de electricidad.

- Yacimientos de media entalpía en los que los fluidos se encuentran a temperaturas situadas entre los 100 y los 150 °C, lo que permite su uso para producción de electricidad mediante ciclos binarios que, en general, tienen rendimientos algo inferiores.

- Yacimientos de baja entalpía, cuando la temperatura del fluido es inferior a los 100 °C y su aplicación son los usos directos del calor (calefacción, procesos industriales y usos en balneoterapia).

En general, los yacimientos de alta entalpía se localizan en zonas de flujo de calor anómalo, mientras que los de baja entalpía corresponden a zonas estables de la corteza, con flujos de calor y gradientes geotérmicos normales que aprovechan los fluidos calientes contenidos en acuíferos profundos, en general sin cobertera impermeable.

2.4. Usos de la Geotermia

Los yacimientos geotérmicos pueden ser explotados de forma directa, utilizando esta energía en forma de calor, o de forma indirecta, siendo aprovechado este recurso para la generación de energía eléctrica. En IDAE & IGME (2008), se mencionan dos formas de aprovechamiento de la energía geotérmica.

Generación de electricidad (Uso indirecto)

Los yacimientos geotérmicos de alta temperatura pueden aprovecharse para generar electricidad mediante un ciclo similar al utilizado en las centrales termoeléctricas convencionales. Dependiendo de las características del recurso geotérmico, la generación de electricidad se realiza mediante turbinas de vapor convencionales (ciclo Rankine) y plantas de ciclo binario.

En la actualidad, la investigación geotérmica se centra en la localización de estructuras favorables para el desarrollo de yacimientos geotérmicos de alta temperatura para la producción de electricidad, aún sin la existencia de fluido o con muy baja permeabilidad. Son los llamados yacimientos geotérmicos de “Roca Caliente Seca” (HDR) o Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS).

Usos Térmicos (Uso directo)

Los recursos geotérmicos de alta temperatura, necesarios para la producción de electricidad, son escasos en comparación con los recursos de media y baja temperatura, por

lo que existen otras aplicaciones para el aprovechamiento de la energía geotérmica que se puede denominar de utilización directa. El uso directo del calor es una de las aplicaciones más antiguas y comunes de la energía geotérmica para balnearios, calefacción residencial, agricultura, acuicultura y usos industriales. Para climatización y refrigeración se utiliza la energía geotérmica de muy baja temperatura, mediante el uso de bomba de calor.

2.5. Investigación de recursos geotérmicos – Favorabilidad geotérmica

La investigación de los recursos geotérmicos se realiza con métodos y técnicas similares a los que se usa en la prospección de otros recursos minerales y energéticos. La metodología de obtención e interpretación de datos es muy parecida en su desarrollo a la empleada en aguas subterráneas e hidrocarburos. El proceso de búsqueda, puesta de manifiesto y valoración de yacimientos geotérmicos se puede representar como una secuencia de fases que obedecen a un plan concreto cuyo fin es ir seleccionando las áreas de mayores posibilidades hasta finalmente encontrar y valorar los recursos (IDAE & IGME, 2008).

El objetivo principal durante la exploración de un campo geotérmico está enfocado en la definición y caracterización de parámetros tales como: forma y estructura del sistema, temperatura, patrón de flujo, tipo de fluido, composición química y estimación del potencial para producción de energía, estos parámetros se determinan a partir de métodos de exploración superficial en la fase de prefactibilidad del proyecto (Coronado & Garciadiego, 2015).

La favorabilidad geotérmica es una medida cualitativa y/o adimensional de la posible existencia de recursos geotermiales en una determinada región, con base en la integración ponderada de los parámetros espaciales considerados relevantes en el control del fenómeno geotérmico Lemus et al. (2015).

El método del modelo de favorabilidad implica el uso de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos para identificar áreas que probablemente tengan potencial geotérmico (Aravena & Lahsen, 2015). El modelo predictivo generado a partir de la integración de datos puede ser del tipo “dato-guiado” o “conocimiento-guiado”, dependiendo si la forma de asignar peso a los parámetros espaciales es a través de un análisis cuantitativo o a través del conocimiento experto de ellos, respectivamente. (Carranza et al, 2008; como se citó en Aguilera et al. (2014). El enfoque utilizado para este trabajo corresponde al segundo, debido a la disponibilidad de información de carácter público que se considera suficiente para general modelos con un buen grado de confiabilidad.

Los sistemas geotérmicos en las zonas de Sotará y Puracé están controlados principalmente por los sistemas volcánicos activos, los cuales funcionan como fuente de calor y que se manifiesta a través de fuentes termales en superficie. Además, se tienen rasgos estructurales de carácter regional como fallas geológicas que favorecen la circulación de fluidos. Las unidades geológicas pueden tener las características de permeabilidad que favorezcan la existencia de un reservorio geotérmico. A partir de esta información se realiza una interpolación por medio de un Software como ArcGIS, en el cual se asigna un peso a cada parámetro y por medio de una calculadora ráster obtener las áreas de mayor potencial para la existencia del recurso.

3. Descripción y reconocimiento del área de estudio

Los municipios de Puracé y Sotará, ubicados en el departamento del Cauca, presentan características geológicas y volcánicas que sugieren la presencia de sistemas geotérmicos de interés. Sin embargo, la exploración y el desarrollo de estos recursos requieren estudios detallados que permitan evaluar la favorabilidad geotérmica de la región. Estas áreas se encuentran en zonas de influencia de sistemas volcánicos con actividad reciente, lo cual se puede evidenciar por la existencia de unidades volcánicas que tienen una gran extensión en estos territorios.

El municipio de Puracé se localiza a 30 kilómetros de la ciudad de Popayán. Su territorio se encuentra ubicado en la cordillera central, con una altitud desde los 2.500 hasta los 5.000 metros sobre el nivel del mar y una temperatura promedio entre 2°C a 15 °C (Alcaldía de Puracé, n.d.). El municipio de Sotará se encuentra a 41 km de la ciudad de Popayán, ubicado sobre la cordillera central, con una altitud media en su cabecera municipal de 2600 metros sobre el nivel del mar y una temperatura media entre 13 °C y 14 °C (Alcaldía Municipal de Sotará, n.d.).

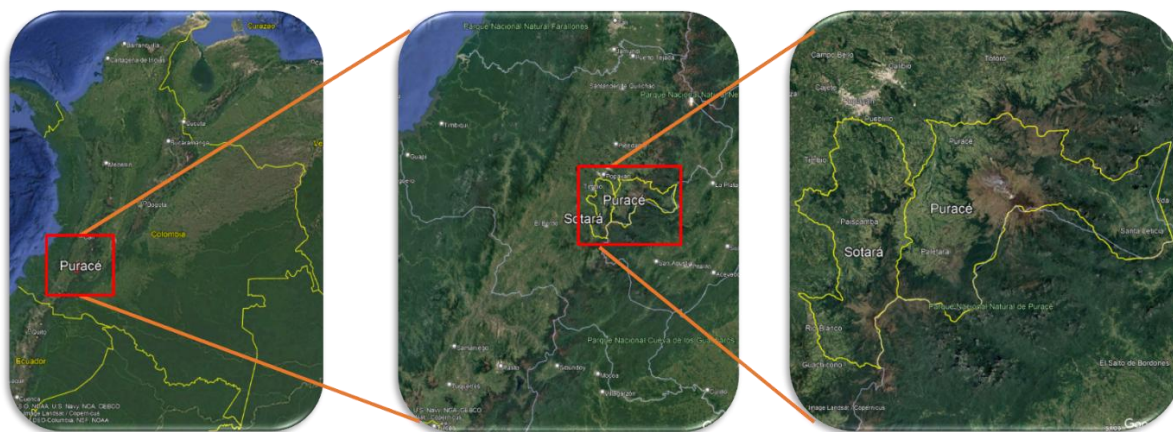


Figura 2. Localización de los municipios de Sotará y Puracé en el departamento del Cauca.

Fuente: propia a partir de Google Earth.

A partir de la información recopilada sobre los estudios de carácter geocientífico, se realiza el reconocimiento y descripción de las zonas de estudio en cuanto a las características geomorfológicas, geológicas, estructurales, entre otras.

3.1. Contexto geodinámico

El contexto geodinámico actual de Colombia es descrito por Servicio Geológico Colombiano (n.d.) de la siguiente manera:

La configuración actual de la margen NW de Suramérica es una región sometida a una intensa deformación debido a la interacción de tres placas litosféricas: la Placa de Nazca y la Placa Caribe de afinidad oceánica y la Placa de Suramérica además del Bloque Panamá al Noroccidente de Colombia. La zona de interacción entre dichas placas, en la zona de deformación de los Andes de Colombia, se ha definido como el Bloque de los Andes del Norte (Trenkamp et al., 2002), como un segmento geológico distintivo. Van der Hilst y Mann (1994) por tomografía sísmica han estimado que la Placa Caribe posee un ángulo de subducción de 17° extendiéndose a una profundidad aproximada de 275 Km, mientras que la placa de Nazca posee un ángulo de subducción de 50° y una profundidad de 500 Km.

Al observar de cerca el contexto geodinámico del noroccidente de Suramérica, se hace evidente la compleja interacción de placas, microplacas y bloques estructurales que controlan la deformación continental en la actualidad (Figura 4). El movimiento de la placa oceánica Nazca en convergencia oblicua con la placa Suramericana (tasa de 54 mm año y subducción de $\sim 35^\circ$), es absorbido parcialmente en el continente y se refleja en el acortamiento cortical en sentido perpendicular a la margen andina, y el movimiento restante es transferido directamente a los sistemas de fallas de rumbo dextral (p.ej. Algeciras, Garrapatas, Ibagué). Más arriba de los 5° N, Entre el límite transcurrente de Hey y el

Cinturón de Deformación del Sur de Panamá, se encuentra la microplaca Coiba desplazándose en sentido perpendicular a la margen continental a una tasa de 25 mm año, produciendo el levantamiento de la Serranía del Baudó. La colisión de la microplaca Costa Rica – Panamá (limitada por los cinturones de deformación al norte y al sur de Panamá) con el continente, más rápida (30 mm año), acentúa la deformación cortical, penetrando a más de 600 km de distancia y generando cabalgamientos (sistemas inversos de piedemonte sub – paralelos a los ejes cordilleranos) y transcurrencias sinestrales (fallas Santa Marta – Bucaramanga, Arma, Uramita, entre otras).

Por otra parte, la convergencia oblicua de la placa oceánica Caribe con el noroccidente Suramericano (15 mm año y subducción de bajo ángulo, $\sim 20^\circ$), también contribuye a la extensa distribución de la deformación continental, y aporta movimiento a las transcurrencias sinestrales en el norte de Colombia (Sistema de fallas Santa Marta – Bucaramanga). Al oriente de las cordilleras, el continente Suramericano se traslada al noroeste a una tasa de 10 mm/año. En síntesis, el estado actual de esfuerzos intracontinentales, derivados de la interacción de placas anteriormente esbozada, han generado una partición de la deformación en sistemas de fallas transcurrentes e inversas, agrupadas dentro del denominado Bloque Norte de los Andes.

La Cordillera Centro-Oriental se ubica entre la Amazonía Colombiana y el Valle interandino del Patía, en el Macizo Colombiano, donde se bifurca en las cordilleras Central y Oriental, consideradas el eje orográfico de los Andes Colombianos y fuente de los ríos Magdalena, Cauca, Patía y Caquetá.

La Cordillera Central en el Cauca presenta una morfología similar en ambos flancos, aunque con diferencias en las geoformas plutónicas. El flanco occidental es semiárido y con poca vegetación, en contraste con el flanco oriental, caracterizado por grandes fallas tectónicas y actividad volcánica. En la parte alta predominan los modelados glaciales, mientras que en la media y baja abundan las rocas metamórficas y volcánicas, con cañones profundos y frecuentes movimientos en masa.

La geología de la región incluye rocas paleozoicas metamórficas, intrusivos del Triásico-Jurásico, cuerpos sedimentarios y formaciones volcánicas. En el flanco occidental, destacan el Complejo Quebradagrande y la Formación Amaime, con bloques volcánicos oceánicos. En la cuenca del Cauca-Patía, se encuentran depósitos de flujos piroclásticos, torrenciales y lahares.

El paisaje volcánico genera colinas cónicas o estratovolcanes, con alternancia de capas de lava y materiales piroclásticos (andesitas y dacitas), alineadas en dirección NE-SW, como la cadena de los Coconucos, el volcán del Huila y Puracé.

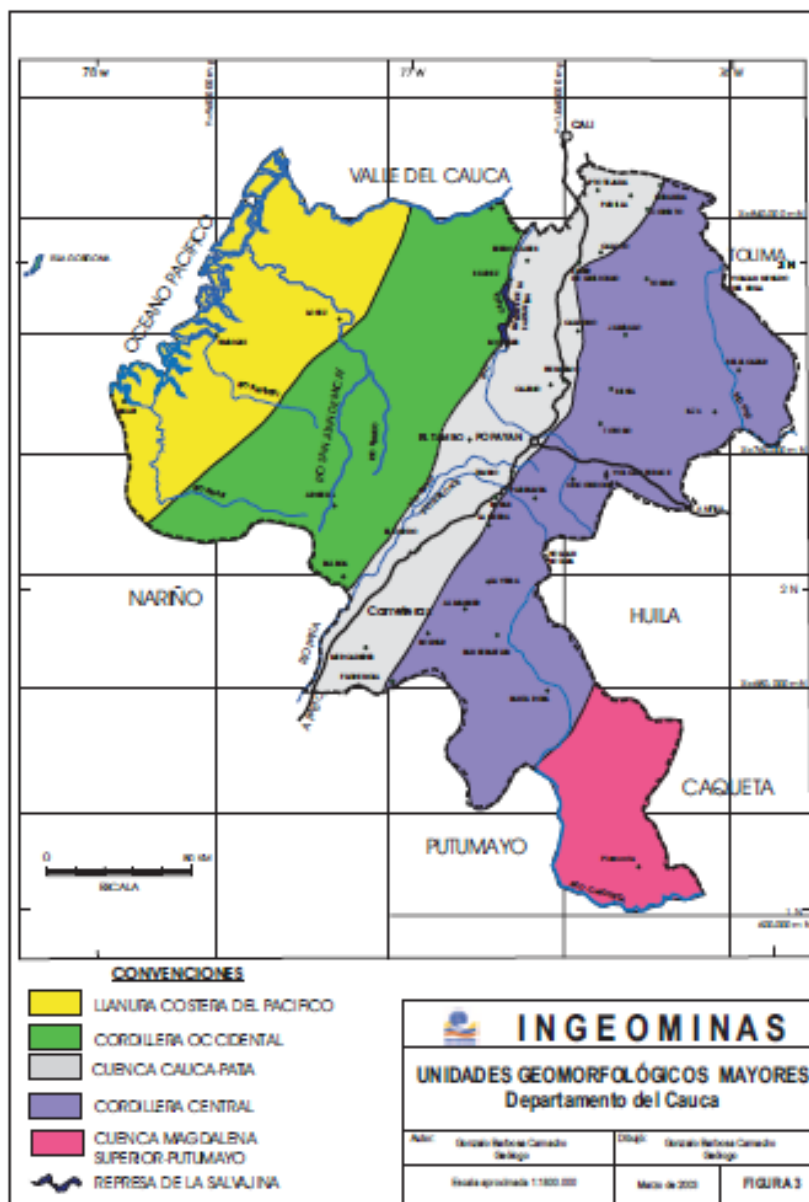


Figura 4. Unidades geomorfológicas mayores en el departamento del Cauca.

Fuente: (Barbosa, 2003).

3.2.1. Rasgos morfológicos en el municipio de Puracé

Los rasgos morfológicos de la región volcánica de Puracé se toman a partir de la información contenida en la memoria explicativa de la plancha geológica 365 (Coconuco) a escala 1:100.000, en la cual se presentan los siguientes tipos de unidades geomorfológicas basadas en los parámetros utilizados por el IGAC (1992).

Tabla 1. Unidades geomorfológicas presentes en la plancha 365 (Coconuco).

Unidades geomorfológicas presentes en el municipio de Puracé	
Ambiente	Nombre subunidad geomorfológica
Unidades de origen aluvial	Abanicos aluviales
	Depósitos de ladera o coluviales
Unidades volcánicas de origen denudacional	Colinas denudadas
	Lomas denudativas
Unidades de origen volcánico	Mesetas piroclásticas
	Mesetas de lava
	Conos de escoria
	Maar
	Cráteres con lago
	Calderas
	Coladas de lava y lavas cordadas
Unidades de origen estructural	Laderas estructurales
Macizos ígneos y metamórficos de origen denudacional	Cerros denudativos de contorno redondeado
Unidades de origen glaciar	Depósitos morrénicos
	Depósitos fluvioglaciares

Fuente: Marquínez et al. (2003).

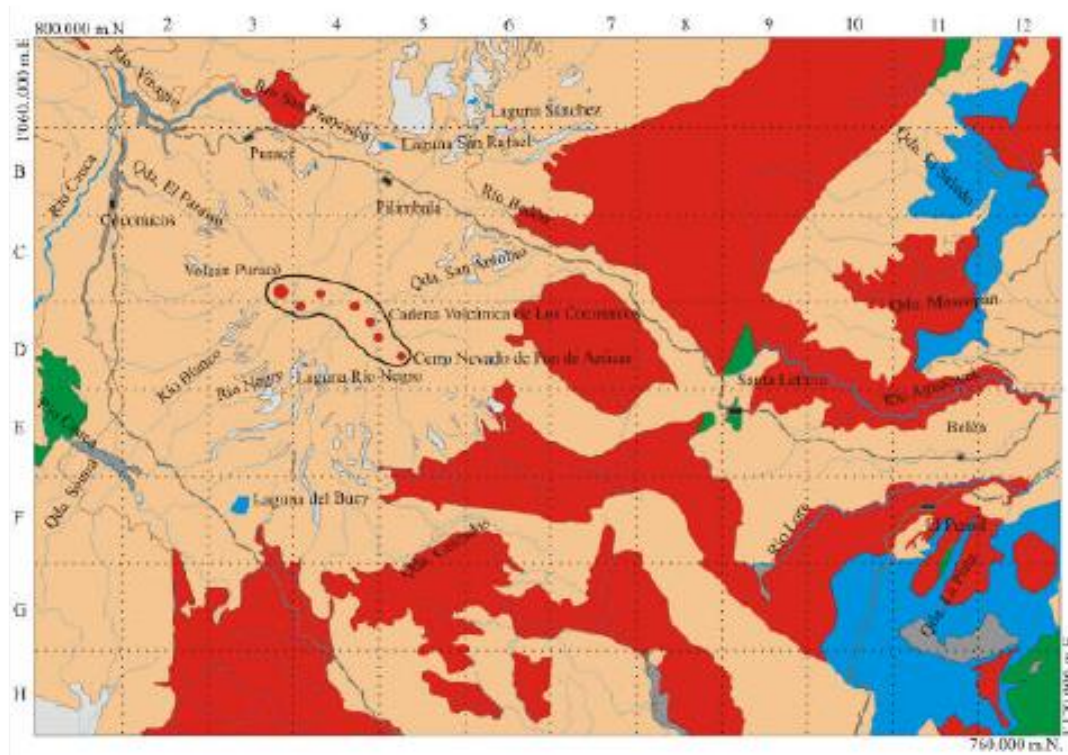


Figura 5. Mapa de unidades geomorfológicas de la plancha 365 (Coconuco).

Fuente: Marquínez et al. (2003).

3.2.2. Rasgos morfológicos en el municipio de Sotará

Los rasgos morfológicos de la región volcánica de Sotará se toman a partir de la información contenida en la memoria explicativa del documento “Zonificación de amenaza por movimientos en masa del municipio de Sotará (Cauca) escala 1:25.000”, en la cual se realizó un mapa de subunidades geomorfológicas. A continuación, se observa la distribución de los ambientes con sus respectivas subunidades geomorfológicas.

Tabla 2. Unidades geomorfológicas presentes en el municipio de Sotará.

Unidades geomorfológicas presentes en el municipio de Sotará		
Ambiente	Nombre subunidad geomorfológica	Código SGMF
Denudacional	Depósito de acumulación denudativa	Dad
	Cima	Dc
	Cuanca denudada extremadamente larga	Dcdel
	Cuenca denudada larga	Dcdl
	Cuenca denudada muy larga	Dcdml
	Cuenca denudada moderadamente larga	Dcdmo
	Coluvión	Dco
	Cuenca remontante	Dcr
	Cerro remanente o relicto	Dcrem
	Cerro residual	Dcrs
	Escarpe	De
	Escarpe de erosión disectado	Deed
	Escarpe faceteado	Def
	Escarpe sobre material volcanoclástico	Demv
	Ladera abrupta	Dlab
	Loma denudada	Dld
	Lomo denudado bajo de longitud corta	Dldbc
	Lomo denudado bajo de longitud larga	Dldbl
	Lomo denudado bajo de longitud media	Dldbm
	Lomo denudado	Dlde
	Lomo denudado de material volcanoclástico	Dldev
	Lomo denudado moderado de longitud larga	Dldml
	Ladera erosiva	Dle
	Ladera erosiva disectada	Dled
	Ladera escarpada a muy escarpada	Dles
	Ladera escarpada a muy escarpada sobre material volcaniclástico	Dlesv
	Ladera inclinada	Dli

Unidades geomorfológicas presentes en el municipio de Sotará		
Ambiente	Nombre subunidad geomorfológica	Código SGMF
	Ladera muy abrupta	Dlma
	Ladera ondulada	Dlo
Fluvial	Cauce fluvial activo	Fca
	Cono de deyección	Fcdy
	Plano o llanura de inundación	Fpi
	Terraza de acumulación	Fta
	Terraza fluvio-torrencial baja	Ftb
	Terraza fluvio-torrencial media	Ftbn
Glaciar	Planicie de valle glaciar	Gaq
	Escarpe de valle glaciar	Gevg
	Morrena lateral	Gml
Estructural	Espolón faceteado	Sefc
	Facetas triangulares	Sft
	Lomo estructural	Sl
	Ladera contrapendiente	Slcp
	Ladera estructural	Sle
	Ladera escalonada abrupta	Slesa
Volcánico	Superficie de abanico volcánico disectada	Vasd
	Cráter volcánico colapsado	Vc
	Colada de lava	Vcl
	Escarpe de borde de cráter	Vcre
	Domo y conjunto de domos volcánicos	Vd
	Escarpe en lavas y flujos de lava	Vfle
	Ladera volcánica abrupta	Vlab
	Ladera volcánica de caldera	Vlcr
	ladera volcánica escarpada	Vle
	Ladera volcánica inclinada	Vli
	Ladera volcánica muy abrupta	Vlma
	Ladera volcánica muy inclinada	Vlmi
	Ladera volcánica plana o suavemente inclinada	Vlpi
	Loma volcánica	Vlvc
	Lomo volcánico de longitud corta	Vlvclc
	Lomo volcánico de longitud larga	Vlvcll
	Lomo volcánico de longitud media	Vlvclm
	Superficie de material volcanoclástico disectado	Vsvcd
	Ladera volcanoclástica de colapso de edificio volcánico	Vvclc
	Ladera volcánica	Vvl

Fuente: Cruz et al. (2021a).

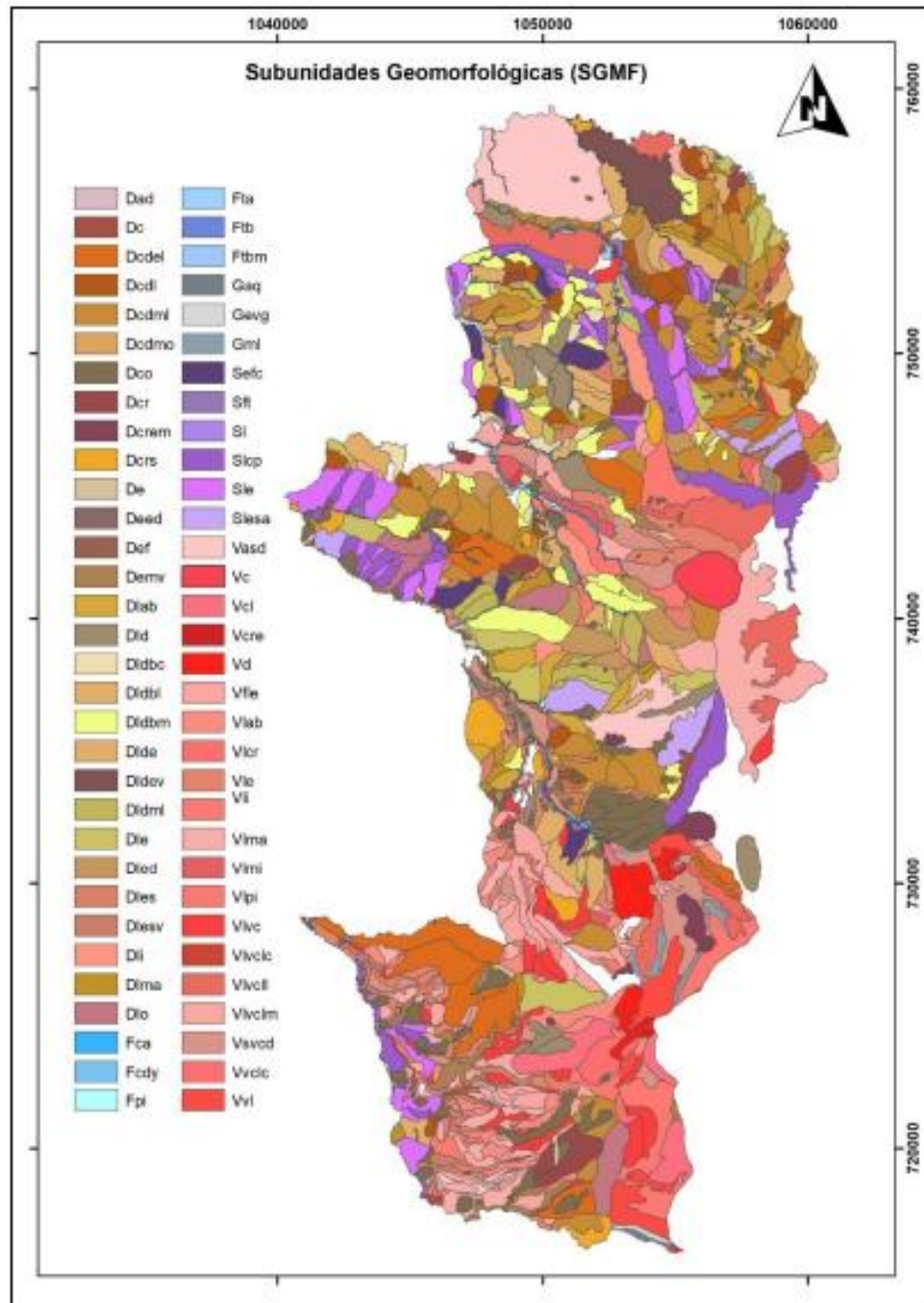


Figura 6. Mapa de distribución de subunidades geomorfológicas en el municipio de Sotará.

Fuente: Cruz et al. (2021b).

3.2.3. Sistemas geotermales definidos a partir de la morfología

Con base en la información anteriormente descrita, se definen los sistemas geotérmicos, tanto para el municipio de Puracé como para el municipio de Sotará, como sistemas de media a alta

entalpía, caracterizados por la presencia de estructuras y unidades volcánicas, además de rasgos estructurales y unidades que pueden favorecer la circulación de fluidos en profundidad.

3.3. Marco geológico

Se realiza una descripción general de los rasgos geológicos correspondientes a las áreas de estudio (Puracé y Sotará).

3.3.1. Marco geológico del municipio de Puracé

El municipio de Puracé se encuentra ubicado dentro de la plancha 365 Coconuco. En esta, Marquínez et al. (2003) describen el marco geológico regional de la Plancha 365 Coconuco de la siguiente manera:

El marco geológico regional de la Plancha 365 Coconuco está relacionado con la Cordillera Central de Colombia, la cual se encuentra conformada, hacia su núcleo, principalmente por rocas metamórficas de edad paleozoica correspondientes al Complejo Cajamarca. Estas rocas están cubiertas en la parte central de la plancha por una espesa capa de vulcanitas recientes pertenecientes a las formaciones Popayán y Coconucos.

Limitado por la Falla Inzá, el Complejo Cajamarca se encuentra en contacto por el oriente con rocas sedimentarias y volcánicas pertenecientes a la secuencia cretácica de la cuenca del Valle Superior del Magdalena, que igualmente se encuentran cubiertas por rocas volcánicas recientes pertenecientes a la Formación Guacacallo.

Al occidente de la plancha, el límite entre las rocas del Complejo Cajamarca y las unidades de roca pertenecientes a la cuenca del valle del Cauca se encuentra cubierto por espesos depósitos volcánicos recientes de la Formación Popayán. De esta forma, el límite del núcleo de la Cordillera Central se infiere en la Falla San Jerónimo, según lo sugieren Ruiz & Marquínez (2002), en la Plancha 343 Silvia. (Marquínez et al., 2003, p. 31)

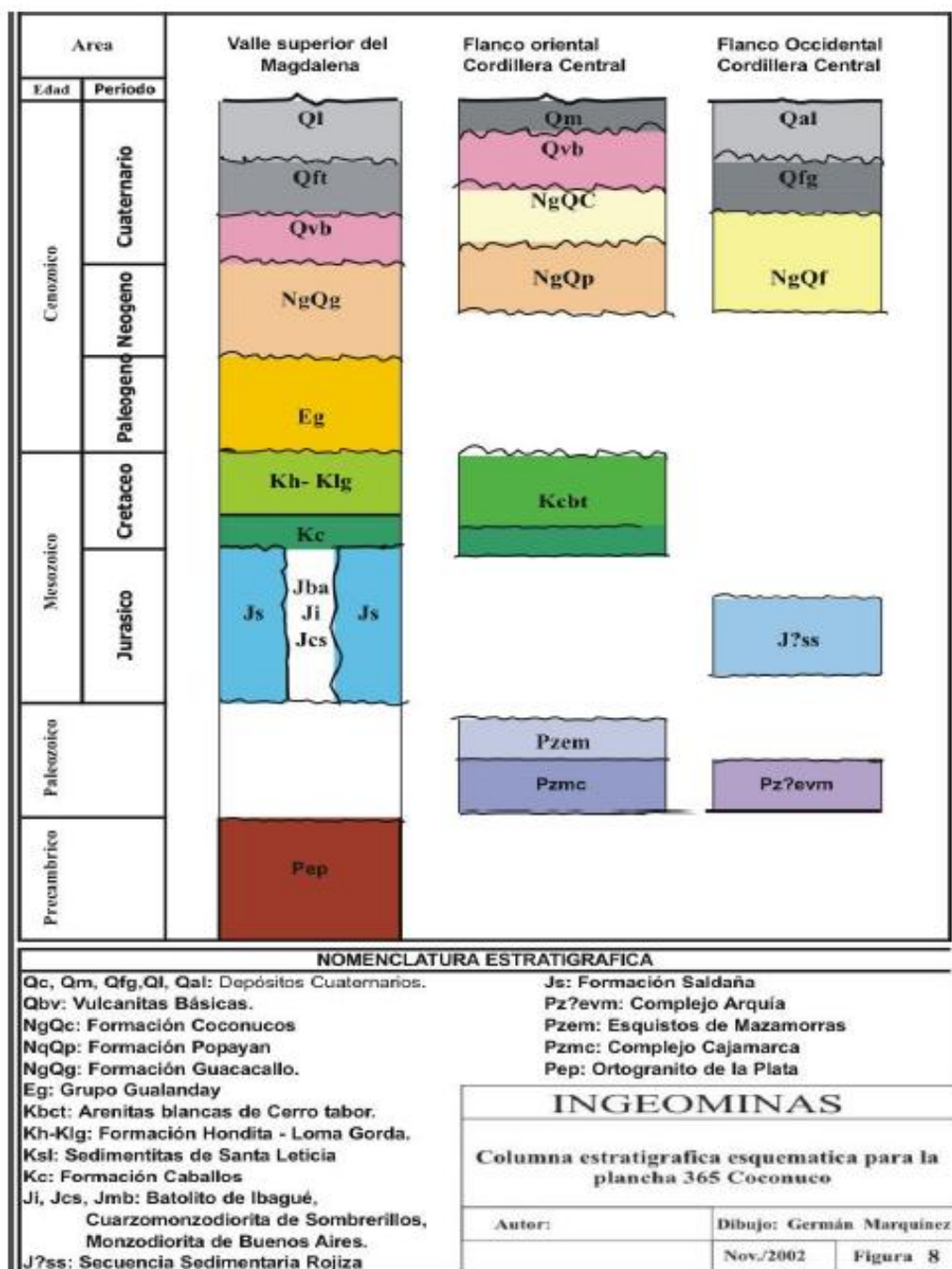


Figura 7. Estratigrafía generalizada de la plancha 365 Coconuco.

Fuente: Marquinez et al. (2003).

La Figura 7 muestra la estratigrafía generalizada de la plancha 365 Coconuco, donde se encuentra localizado el municipio de Puracé.

3.3.2. Margo geológico del municipio de Sotará

Orrego & Acevedo (1996) describen el marco geológico regional de la Plancha 364 Timbío con base en cuatro provincias geomorfológicas presentes en esta área: Cordillera Central, Valle interandino Cauca-Patía-Altiplano Nariñense, Cordillera Occidental y Costa Pacífica. En este capítulo se hará énfasis en las descripciones de la Cordillera Central y el Valle Interandino Cauca-Patía, dentro de los que se encuentra ubicado el municipio de Sotará. A partir de esto, Orrego & Acevedo (1996) describen el marco geológico de la siguiente manera:

Cordillera Central

El núcleo de esta provincia está conformado por un complejo migmatítico del Precámbrico que aparece hacia el sur del departamento de Nariño (Murcia y Cepeda, 1991), en contacto tectónico, con rocas metamórficas correlacionables con el Complejo Cajamarca del Paleozóico. Al oriente de esta cordillera se encuentra una secuencia volcánica-sedimentaria e intrusivos de edad Triásico-Jurásico. El flanco occidental presenta mayores complicaciones estructurales y en sentido amplio, puede corresponder a un “melanje”, resultado de la interacción de la Placa Pacífica y la Placa Suramericana, durante la evolución de la margen occidental de Suramérica.

Una secuencia volcánica-sedimentaria cretácea de ambiente oceánico, un cuerpo granitoide alargado de edad mesozóica, con evidencia de metamorfismo dinámico, aparecen como bloques alóctonos cerca de la cima de esta unidad geomorfológica. Grandes fallas que constituyen el sistema de fallas de Romeral, en el flanco occidental de esta cordillera, en una distancia E-W de 40 km, marcan una zona de gran tectónica. Otros sistemas de fallas en dirección E-W a 60° W, cortan los sistemas de dirección N-S.

Cuerpos intrusivos de edad cenozoica y una cadena de volcanes del Neógeno-Cuaternario, asociados a las fallas regionales de dirección N-S, ocupan la parte más alta de la cordillera y han servido como focos de las emisiones lávicas y piroclásticas, con abundantes flujos de ignimbritas y lahares.

Algunos rasgos geomorfológicos y depósitos de morrenas, cerca de los focos volcánicos, indican una interacción glacial, que contribuyó a la erosión, originando una gran cantidad de sedimentos que fueron retrabajados y depositados hacia el occidente de la cordillera por la acción de los ríos. La Cordillera Central está limitada por fallas inversas de ángulo alto con un estilo tectónico aproximadamente al norte y que buzan en general al este. Sin embargo, algunas de estas fallas muestran características de fallas de rumbo.

Valle Interandino Cauca-Patía-Altiplano Nariñense

Esta unidad geomorfológica, que aparece entre las fallas de Romeral y de Cali-Patía, presenta un basamento de rocas oceánicas mesozoicas, las cuales se pueden observar en los cauces de los ríos Palacé y Cauca, en los sectores de los Cerros San Rafael y La Tetilla, al noroeste de Popayán. Rocas de la molasa terciaria, intruidas por cuerpos ígneos de composición intermedia, recubren el basamento oceánico debido al levantamiento tectónico a lo largo de las fallas Mosquerillo-La Tetilla de orientación N-S que buzan con un ángulo alto. La molasa infrayace una secuencia volcano-sedimentaria del Cenozoico tardío, producto de la actividad volcánica y erosiva fluvio-glacial. Se han identificado en esta unidad tres fallamientos cuyos estilos tectónicos son: uno aproximadamente N-S, un segundo con rumbo N 55° W y un tercero con dirección E-W, que forman bloques tectónicos entre las dos zonas de fallas principales: Cali-Patía, al W y Romeral, al E.

La Figura 8 muestra la columna estratigráfica generalizada del municipio de Sotará.

COLUMNA ESTRATIGRAFICA GENERALIZADA DEL MUNICIPIO DE SOTARÁ

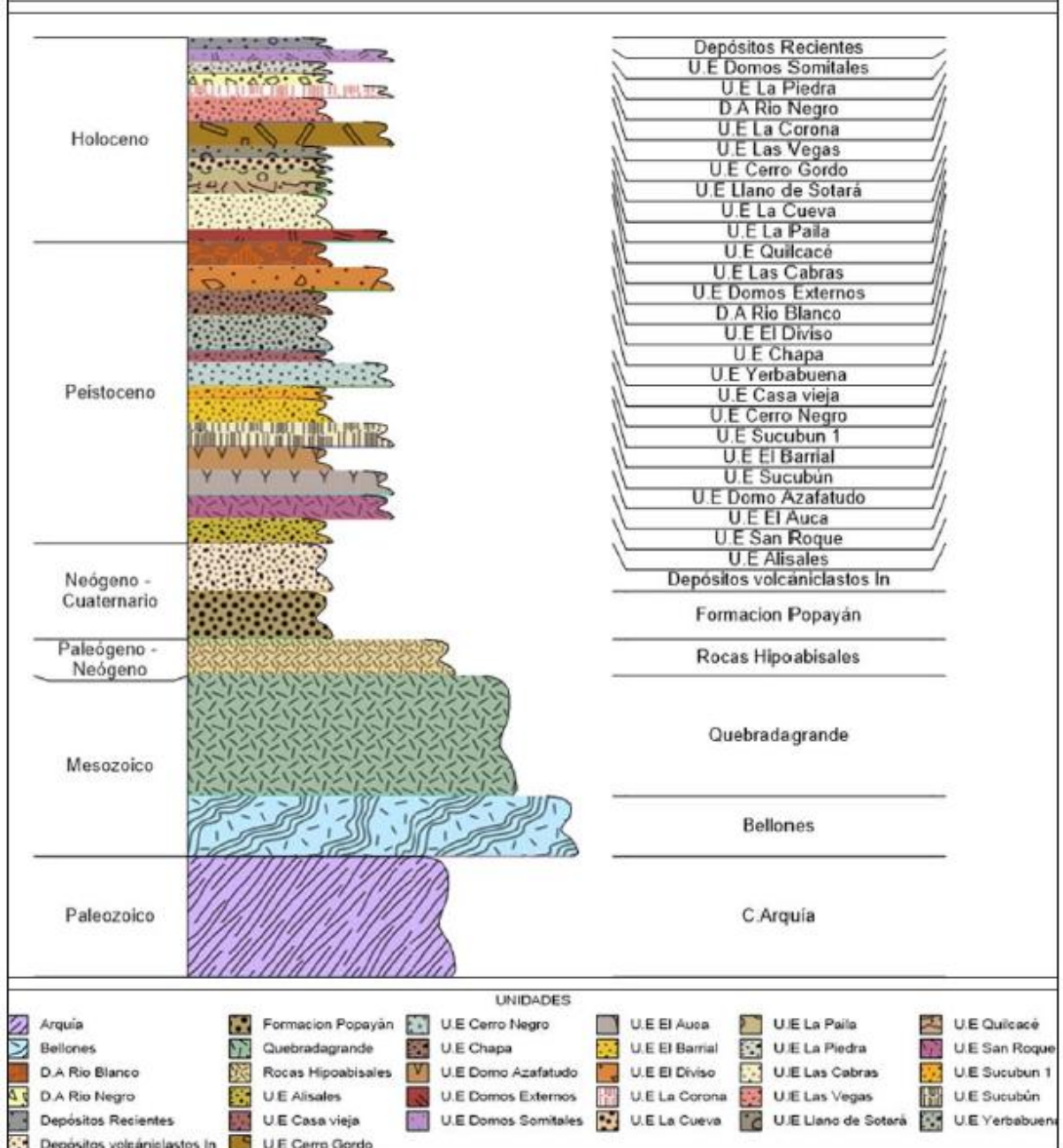


Figura 8. Columna estratigráfica del municipio de Sotará.

Fuente: Cruz et al. (2021b).

3.4. Marco estructural

3.4.1. Marco estructural del municipio de Puracé

El marco estructural de la plancha geológica 365, donde se encuentra ubicado el municipio de Puracé, comprende los dos flancos y el eje de la Cordillera Central en su parte sur y la porción suroccidental del Valle Superior del Magdalena, limitados al oriente por la falla de Inzá y al occidente por la falla San Jerónimo (Marquínez et al., 2003). A continuación, se describen las tres regiones morfoestructurales según Marquínez et al. (2003):

Región morfoestructural occidental

La región morfoestructural occidental comprende el flanco occidental de la Cordillera Central y está limitada por la Falla San Jerónimo al oriente, la cual involucra rocas del Complejo Arquía y rocas volcánicas de edad cenozoica. Esta región se encuentra atravesada por el Sistema de Fallas Romeral nombre dado originalmente por Grosse (1926), bajo la denominación de sobreescurreamiento de Romeral; posteriormente McCourt (1984), Orrego & Acevedo (1999), Mosquera & Orrego (1990), la cartografían en el flanco suroeste de la Cordillera Central, en los departamentos de Valle del Cauca y Cauca.

Sobre este sector, el Sistema de Fallas Romeral agrupa las Fallas Silvia - Pijao y San Jerónimo, las cuales se encuentran afectando rocas paleozoicas y depósitos de cenizas recientes (París et al., 1992).

Estas fallas muestran caracteres morfológicos de tectónica activa, como escarpes continuos, desarrollo de facetas triangulares, quiebres de pendientes, cuchillas lineales y, en menor cantidad, silletas y corrientes o valles alineados.

Región morfoestructural central

El eje de la cordillera está enmarcado al oeste por la Falla San Jerónimo y al este por la Falla Inzá, y agrupa rocas pertenecientes al Complejo Cajamarca, que son consideradas como las formadoras de la protocordillera Central durante el Paleozoico.

En la Plancha 365 Coconuco, esta región se presenta cubierta en gran parte por los productos efusivos de la cadena volcánica de Los Coconucos.

Región morfoestructural oriental

La región morfoestructural oriental corresponde fisiográficamente con el Valle Superior del Magdalena en la Plancha 365 Coconuco y agrupa rocas sedimentarias de edad cretácica de las formaciones Caballos, Hondita y Loma Gorda; rocas volcano sedimentarias de la Formación Saldaña; también involucra rocas del Cenozoico correspondientes a la Formación Gualanday.

Dentro de esta región limitada al occidente por la Falla Inzá, se encuentran las fallas La Plata y Las Minas que afectan rocas de la Formación Saldaña y el Batolito Ibagué.

3.4.2. Marco estructural del municipio de Sotará

Khumara et al. (2014a) describen el marco estructural de la plancha 364 Timbío, donde se encuentra el municipio de Sotará, como un área con gran complejidad estructural, donde la gran mayoría de las rocas se encuentran falladas y diaclasadas, las fallas siguen dos direcciones principales NW y NE, y localmente aparecen en dirección N-S y E-W. El área del municipio se encuentra principalmente en zona de influencia del sistema de fallas de Romeral, compuesto por fallas inversas de alto ángulo con desplazamientos horizontales significativos, inclinadas hacia el este y con una orientación noreste. Este sistema marca el límite entre rocas oceánicas del Cretácico Temprano y rocas continentales. Dentro de este sistema se incluyen las megafallas San Jerónimo y Timbío - Pijao, esta última relacionada con las fallas Las Estrellas y El Crucero, así como las fallas

Popayán y Piendamó, que a su vez están asociadas con las megafallas de Cauca – Almaguer (Orrego y Acevedo, 1996; como se citó en Khumara et al., 2014b).

3.5. Marco volcanológico

La actividad volcánica neógeno – cuaternaria en Colombia está relacionada con la interacción entre las placas Nazca y Suramérica, y presenta características geológico - estructurales típicas de una zona asociada a procesos de subducción a lo largo de la margen continental (Pennington, 1981; Wilson, 1989; como se citó en López et al. (2011). La representación de esta actividad se da con base en las unidades geológicas cuaternarias de origen volcánico que han sido identificadas en las zonas de estudio. A continuación, se realiza una descripción de las características del volcanismo reciente tanto en el municipio de Puracé como en el municipio de Sotará.

3.5.1. Marco volcanológico en el municipio de Puracé

El volcanismo reciente en el municipio de Puracé está marcado por la actividad de la Cadena Volcánica Los Coconucos, ubicados dentro del área del municipio. Como se menciona en López et al. (2011), los centros de emisión cartografiados de lo que se conoce como la cadena volcánica Los Coconucos son parte de un volcanismo resurgente que se inició en antiguas estructuras caldércas como son las calderas de Paletará y de Chagartón. Además, en López et al. (2011) se realiza la siguiente descripción general de las unidades geológicas asociadas al volcanismo reciente en esta región:

La denominada Formación Popayán agrupa los productos volcánicos asociados a la actividad de la Caldera del Paletará (Torres et al., 2009, 2011) y la Formación Coconucos agrupa los depósitos asociados a la caldera de Chagartón (Monsalve, 2000). La Formación Coconucos (Monsalve, 2000) está constituida por la intercalación e interdigitación de depósitos de flujo de lava y depósitos de flujo de piroclástico, con un rango de edad entre

3 millones de años y el tiempo actual y está constituida por cinco miembros, de acuerdo con las características litológicas y su génesis; estos miembros en orden estratigráfico son: Miembro Chagartón, Miembro Río Negro, Miembro San Francisco, Miembro Paletará y Miembro Puracé. El Miembro Chagartón agrupa los productos efusivos asociados a un centro de emisión que se localizaría al suroccidente del Puracé actual y está constituido por depósitos de flujo de lava andesítica que afloran en el área de la población de Coconuco; estos depósitos provienen de la actividad del volcán que dio origen a la Caldera de Chagartón, estructura de aproximadamente de 40 m de diámetro, de la cual actualmente solo se conservan remanentes que conforman el llamado cerro Chagartón al noroccidente del volcán Puracé (Acevedo et al., 1987; Monsalve y Pulgarín, 1993).

3.5.2. Marco volcanológico en el municipio de Sotará

Dentro del municipio de Sotará se encuentra el volcán Sotará, el cual según Pulgarín et al. (2009), es un volcán activo que hace parte del complejo volcánico Sotará, que incluye remanentes de un estratovolcán antiguo (Pre-Sotará) sobre el cual se construyó el volcán Sotará actual, y otros conos volcánicos, los cuales evolucionaron en un periodo de tiempo entre el desarrollo del volcán Pre-Sotará y comienzos del Sotará. También se menciona en Pulgarín et al. (2010) la siguiente asociación entre los depósitos volcánicos con las estructuras del complejo volcánico Sotará:

Al volcán Pre-Sotará se asocian grandes depósitos ignimbríticos intercalados con depósitos de flujos de lava, cenizas de caída y por lo menos un depósito de flujo de bloques y ceniza soldado, además de enormes flujos de escombros y avalanchas de escombros. La generación de algunas ignimbritas, de gran volumen, ocasionaron la destrucción del edificio volcánico y la formación de una caldera; posterior a esta estructura caldérica, se desarrolló un vulcanismo resurgente principalmente de tipo cónico, localizado en los bordes de esta

o en los flancos externos muy cerca a ellos, que dio origen a los volcanes Cerro Negro, Cerro Azafatudo y Cerro Gordo. Posteriormente, en el centro de la caldera se desarrolló el volcán Sotará en tres etapas, caracterizadas también por la generación y destrucción de domos, además de algunos depósitos de flujo de lava asociados a éstos. En el área cercana al Complejo Volcánico Sotará, 8 km al sur, se encuentra el volcán Sucubún, el cual presenta una estructura caldérica, desarrollo de un cráter y domo en su interior y por estas características se considera un centro volcánico independiente y no se asoció a la evolución del Complejo Volcánico del Sotará.

4. Procesamiento y análisis de la información disponible

4.1. Unidades Geológicas

El análisis de las unidades geológicas se enfocará exclusivamente en función de su litología y edad, dado que estos parámetros son fundamentales para evaluar la favorabilidad geotérmica. Estos factores son clave para identificar unidades con potencial para la circulación y almacenamiento de fluidos en los sistemas geotérmicos de las regiones de estudio.

4.1.1. Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé

Las unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé se tomaron a partir de la información descrita en Marquínez et al. (2003). La Tabla 3 muestra las unidades geológicas junto con una pequeña descripción de su composición litológica y la edad asociada.

Tabla 3. Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé.

Código	Nombre	Litología	Edad
Pzem	Esquistos Mazamorra	Esquistos de color verde y negro, cuarzo micáceos y cuarcitas	Paleozóico temprano
PZmc	Complejo Cajamarca	Esquistos de color verde y negro, cuarzo micáceos y cuarcitas, filitas grafitosas y calcáreas, metalimolitas, metachertz y esquistos sericiticos.	Paleozóico temprano - Cretácico
Ji	Batolito de Ibagué	Cuerpo intrusivo de composición entre granito, granodiorita, cuarzomonzodiorita y monzodiorita.	Jurásico
J?ss	Secuencia sedimentaria rojiza	Conglomerados, areniscas cuarzosas, limolitas y arcillolitas	Jurásico
Ksl	Sedimentitas Santa Leticia	Sucesión de cuarzoarenitas intercaladas con capas de lodolitas carbonosas.	Cretácico
Kcq	Complejo Quebrada Grande	Sedimentitas (limolitas, arcillolitas, grauvacas conglomeráticas y conglomerados grauváquicos) y flujos basálticos.	Cretácico
NQg	Formación Guacacallo	Constituida principalmente por tobas predominantemente vítreas.	Neógeno (Plioceno tardío)

Código	Nombre	Litología	Edad
Npjl	Formación Popayán - Miembro Julumito	Depósitos de ignimbritas con textura porfiritica	Neógeno
Nppl	Formación Popayán - Miembro Polindara	Flujos de lava andesítica.	Neógeno
Nch	Formación Coconucos - Miembro Chagartón	Depósitos de flujos de lava masivos a columnares	Neógeno - Cuaternario
NgQf	Depósitos de lahares	Lahares correspondientes a flujos piroclásticos removidos, con fragmentos de rocas volcánicas y madera carbonizada.	Neógeno- Cuaternario
NgQf	Vulcanitas del Galeón	Depósitos de lahares correspondientes a flujos piroclásticos removidos	Neógeno - Cuaternario
Qplv	Formación Popayán - Miembro La Venta	Flujos de ceniza y cenizas de caída	Pleistoceno
Qpt	Formación Coconucos - Miembro Paletará	Flujos de ceniza	Neógeno - Cuaternario
Qsf	Formación Coconucos - Miembro San Francisco	Ceniza y escoria, con zonas de flujo	Neógeno - Cuaternario
Qsh	Formación Coconucos - Miembro Shaka	Lavas recientes de la Cadena Volcánica Los Coconucos	Neógeno - Cuaternario
Qc	Formación Popayán	Depósitos de cenizas o tefras	Plioceno - Cuaternario
Qal	Depósitos aluviales	Gravas, arenas y arcillas asociados a cauces actuales y márgenes de los principales drenajes de los dos flancos de la cordillera central.	Cuaternario
Qfg	Depósitos fluvioglaciares	Sin descripción	Cuaternario
Qfl	Depósitos fluviolacustres	Sin descripción	Cuaternario
Qlb	Lavas Laguna del Buey	Flujos de lava andesítica	Cuaternario
Qls	Lavas Santa Leticia	Flujos de lava andesítica	Cuaternario
Qm	Depósitos morrénicos	Sin descripción	Cuaternario
Qp	Formación Coconucos - Miembro Puracé	Flujos de ceniza	Cuaternario

Fuente: Marquinez et al. (2003).

A continuación, se muestra la distribución de las unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé.

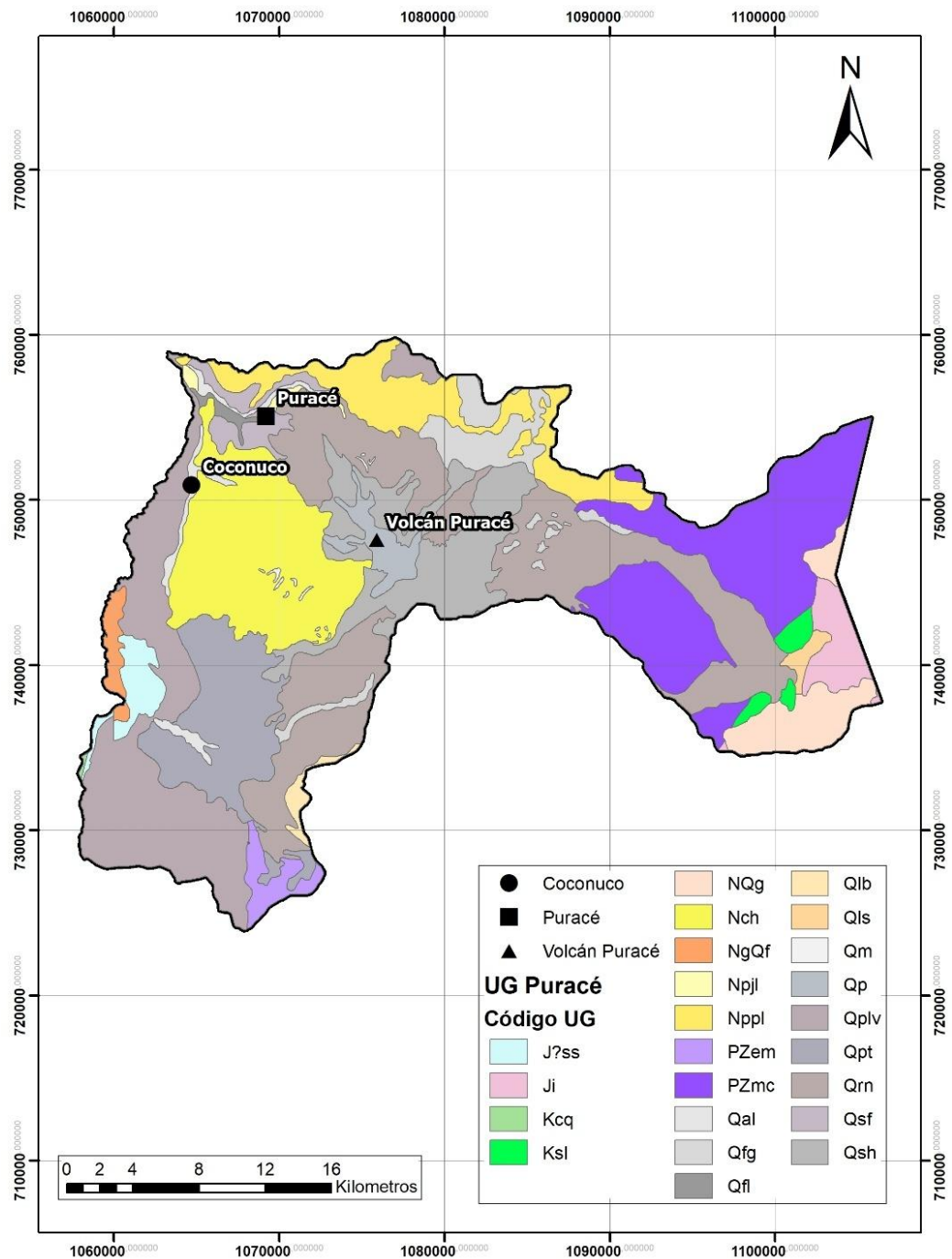


Figura 9. Distribución de las unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé.

Fuente: Propia a partir de la información de Marquínez et al. (2003).

4.1.2. Unidades geológicas presentes en el municipio de Sotará

La Tabla 1 muestra las unidades geológicas presentes en el municipio de Sotará, obtenidas a partir del estudio realizado por Cruz et al. (2021b), el cual brinda información de la geología del municipio a escala 1:25.000, y permite tener un mejor nivel de detalle para el análisis de los recursos geotérmicos.

Tabla 4. Unidades geológicas presentes en el municipio de Sotará.

Código	Nombre/Litología	Edad
Rmeca	Roca de calidad mala de esquistos cuarzo micáceos y grafitosos del Complejo Arquía	Paleozóico
Rmeva	Roca de calidad mala de esquistos verdes del Complejo Arquía	Paleozóico
Rmlcq	Roca de calidad mala lavas del Complejo Quebradagrande	Mesozóico
Rrca	Roca de calidad regular de obsidiana Cerro Azafatudo	Pleistoceno
Rrcpd	Roca de calidad regular Cierra Puertas - El Diviso	Pleistoceno
Rrdc	Roca de calidad regular Unidad Eruptiva Domo Colada	Cuaternario
Rrde	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva Domos Externos	Holoceno
Rreca	Roca de calidad regular de esquistos cuarzo micáceos y grafitosos del Complejo Arquía	Paleozóico
Rrgb	Roca de calidad regular granitoide de Bellones	Mesozóico
Rriea	Roca de calidad regular ignimbrita soldada El Auca	Pleistoceno
Rrifp	Rocas de calidad regular de ignimbritas de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario
Rrl	Roca de calidad regular lavas y flujos de lava	Cuaternario
Rrlc	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva La Corona	Holoceno
Rrlcg	Roca de calidad regular lavas Cerro Gordo	Holoceno
Rrlcq	Roca de calidad regular lavas del Complejo Quebradagrande	Mesozóico

Código	Nombre/Litología	Edad
Rrls	Roca de calidad regular Unidad Eruptiva Lavas de los Domos Somitales	Holoceno
Rrpa	Roca de calidad regular de pórfido andesítico	s.f.
Rrs	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva Sucubún	Pleistoceno
Rrsr	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva San Roque	Pleistoceno
Rrcn	Roca de calidad regular lavas Cerro Negro	Pleistoceno
Srcp	Suelo residual de depósitos de caídas piroclásticas	Cuaternario
Srdifp	Suelo residual de depósito de ignimbrita de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario
Srea	Suelo residual de depósito de ignimbrita soldada El Auca	Pleistoceno
Sreca	Suelo residual de esquistos cuarzomicaceos del Complejo Arquía	Paleozoico
Srfp	Suelo residual de depósitos volcanoclásticos de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario
Srgb	Suelo residual del Granitoide de Bellones	Mesozoico
Srvi	Suelo residual de depósito volcanoclástico indiferenciado	Cuaternario
Srvlc	Suelo residual de depósito volcanoclástico Las Cabras	Holoceno
Stad	Suelo transportado de depósito de acumulación denudativa	Cuaternario
Staerb	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica Río Rioblanco	Pleistoceno
Staern	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica y lahar Río Negro	Holoceno
Stae	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica	Cuaternario
Stc	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva Chapa	Pleistoceno
Stcfa	Suelo transportado en cauce fluvial activo	Cuaternario
Stco	Suelo transportado de coluvión	Cuaternario
Stcp	Suelo transportado de depósitos de caídas piroclásticas	Cuaternario

Código	Nombre/Litología	Edad
Stcv	Suelo transportado volcaniclástico Casa Vieja	Pleistoceno
Stdf	Suelo transportado de depósitos fluviales mixtos	Cuaternario
Steb	Suelo transportado volcaniclástico Unidad eruptiva El Barrial	Pleistoceno
Stfg	Suelo transportado fluvio - glaciar	Cuaternario
Stfvlc	Suelo transportado por flujos volcaniclásticos Las Cabras	Holoceno
Stla	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Los Alisales	Pleistoceno
Stlc	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Las Cabras	Holoceno
Stlcu	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Cueva	Holoceno
Stlp	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Piedra	Holoceno
Stlpa	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Paila	Holoceno
Stlsy	Suelo transportado volcaniclástico Unidades Eruptivas Llano de Sotará y Unidad Eruptiva Yerbabuena	Pleistoceno
Stlv	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Las Vegas	Holoceno
Stq	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Quilcacé	Holoceno
Sts1	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Sucubún 1	Pleistoceno
Stta	Suelo transportado de terraza aluvial	Cuaternario
Stvi	Suelo transportado de depósito volcaniclástico indiferenciado	Cenozoico
Sty	Suelo transportado por flujos volcaniclásticos Yerbabuena	Pleistoceno

Fuente: Marquinez et al. (2003).

A continuación, se muestra la distribución de las unidades geológicas presentes en el municipio de Sotará.

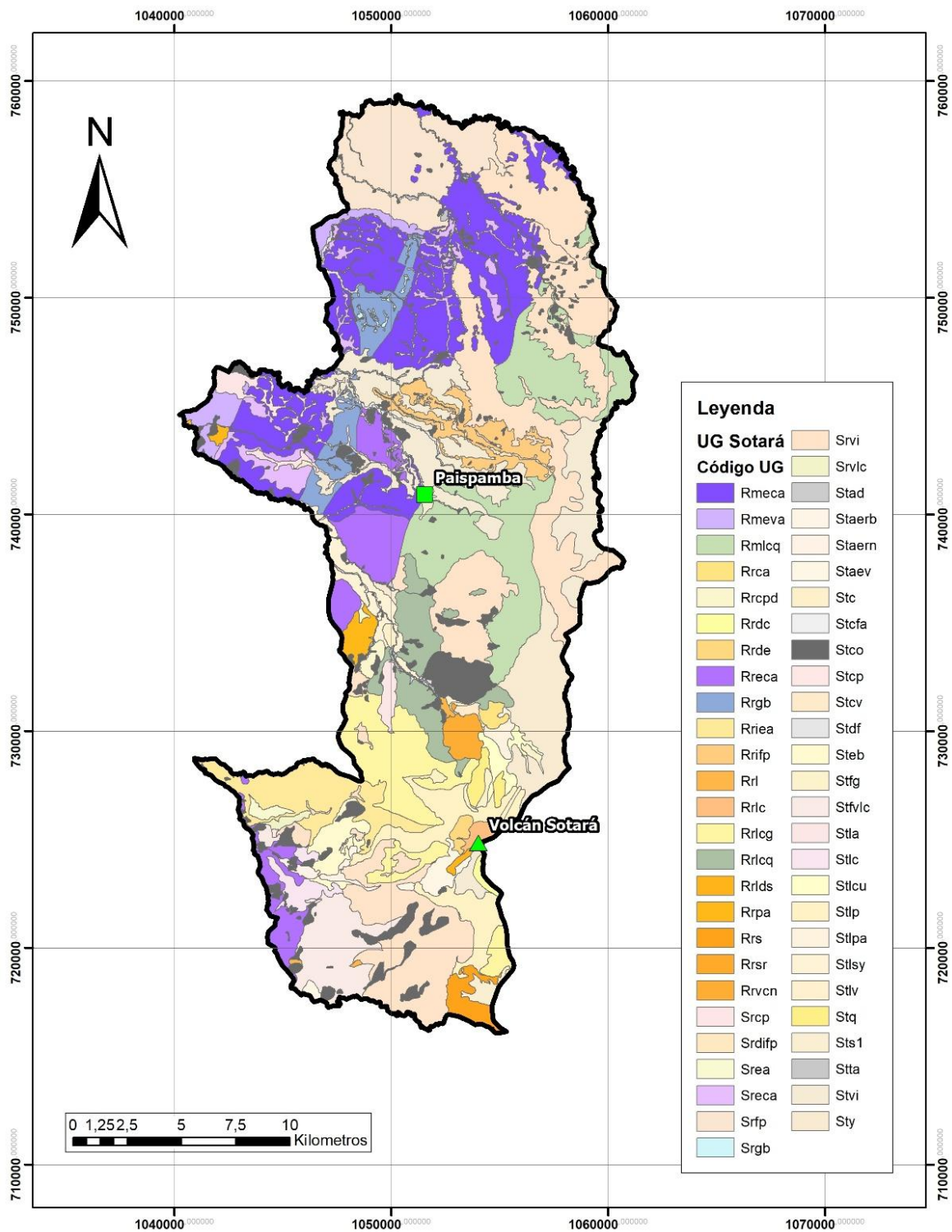


Figura 10. Distribución de las unidades geológicas presentes en el municipio de Sotará.

Fuente: Propia a partir de la información de Cruz et al. (2021a).

4.2. Estructuras geológicas

La información de las estructuras geológicas presentes en las áreas de estudio se enfocará en identificar su extensión y el régimen de esfuerzos a los que están asociadas, ya que estos son los factores que permitirán evaluar la favorabilidad según la metodología aplicada para este estudio.

4.2.1. Estructuras geológicas en el municipio de Puracé

La Tabla 5 muestra las estructuras geológicas presentes en el municipio de Puracé, clasificadas según el rango de extensión y el régimen de esfuerzos al que pertenecen según la información consignada en Marquínez et al. (2003).

Tabla 5. Estructuras geológicas presentes en el municipio de Puracé.

Estructura	Extensión (km)	Régimen de esfuerzos
Falla Silvia-Pijao	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla de Moras	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla de Moras Oeste	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla de Moras Este	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla de Coconucos	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla San Jerónimo	>100 km	Compresivo
Falla de Inzá	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla 1	Entre 10 y 100 km	Compresivo

Fuente: Marquínez et al. (2003).

La Figura 11 muestra la distribución de las estructuras geológicas mencionadas anteriormente dentro del municipio de Puracé.

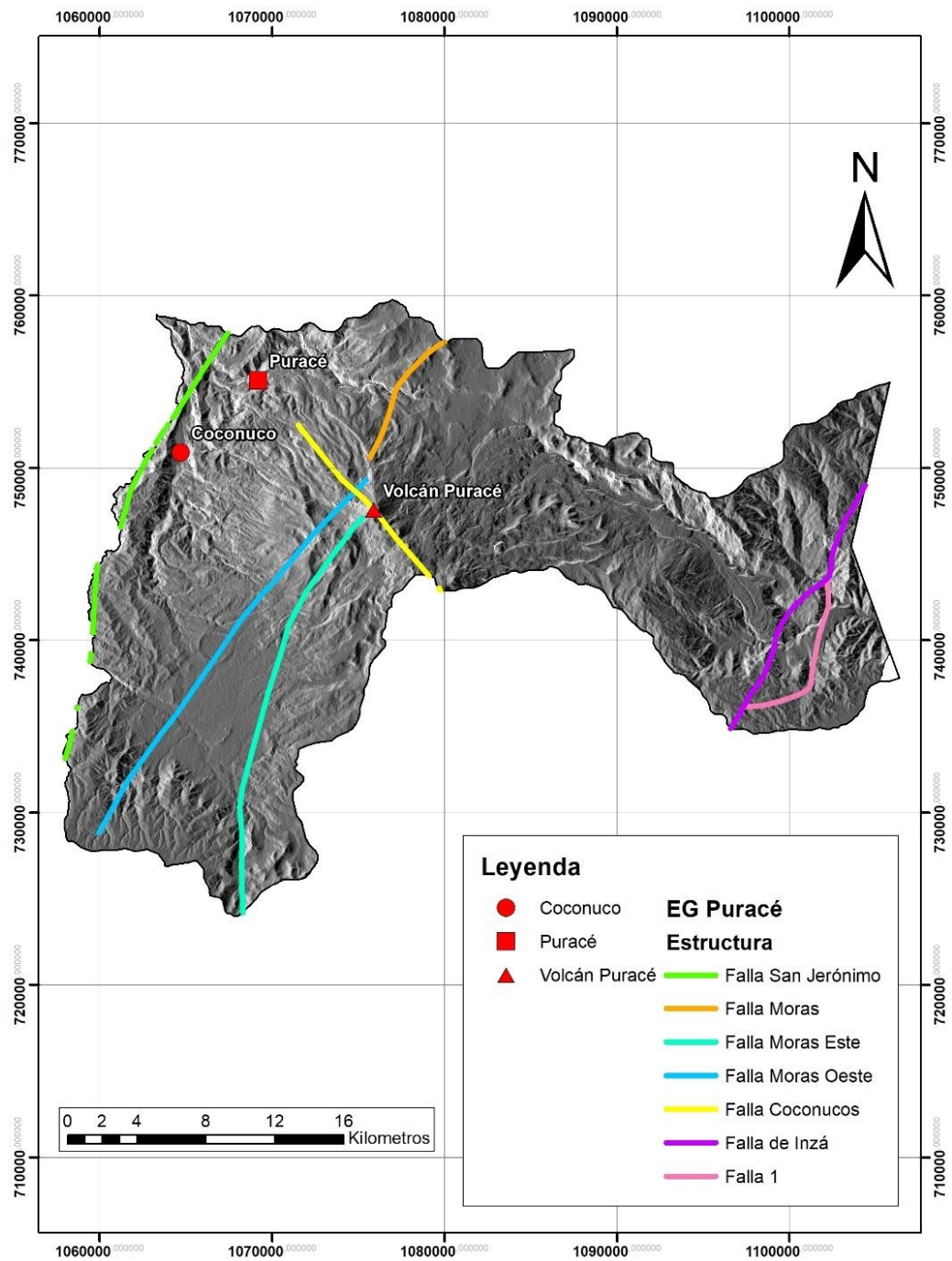


Figura 11. Distribución de las estructuras geológicas presentes en el municipio de Puracé.

Fuente: Propia a partir de la información de Marquinez et al. (2003).

4.2.2. Estructuras geológicas en el municipio de Sotará

La Tabla 6 muestra las estructuras geológicas presentes en el municipio de Sotará, clasificadas según el rango de extensión y el régimen de esfuerzos al que pertenecen según la información consignada en Cruz et al. (2021a).

Tabla 6. Estructuras geológicas presentes en el municipio de Sotará.

Estructura	Extensión (km)	Régimen de esfuerzos
El Crucero	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Guabas	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Las Estrellas	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Popayán	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Quilcacé	Entre 10 y 100 km	Compresivo
San Jerónimo	>100 km	Compresivo
Silvia Pijao	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Río Guachicono	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla 1	Entre 1 y 10 km	Compresivo
Falla 2	Entre 1 y 10 km	Compresivo
Falla 3	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla 4	Entre 1 y 10 km	Compresivo
Falla 5	Entre 10 y 100 km	Compresivo
Falla 6	Entre 1 y 10 km	Compresivo
Falla 7	Entre 1 y 10 km	Compresivo
Falla 8	Entre 1 y 10 km	Compresivo
Falla 9	Entre 1 y 10 km	Compresivo

Fuente: Cruz et al. (2021a).

La Figura 12 muestra la distribución de las estructuras geológicas mencionadas anteriormente dentro del municipio de Sotará.

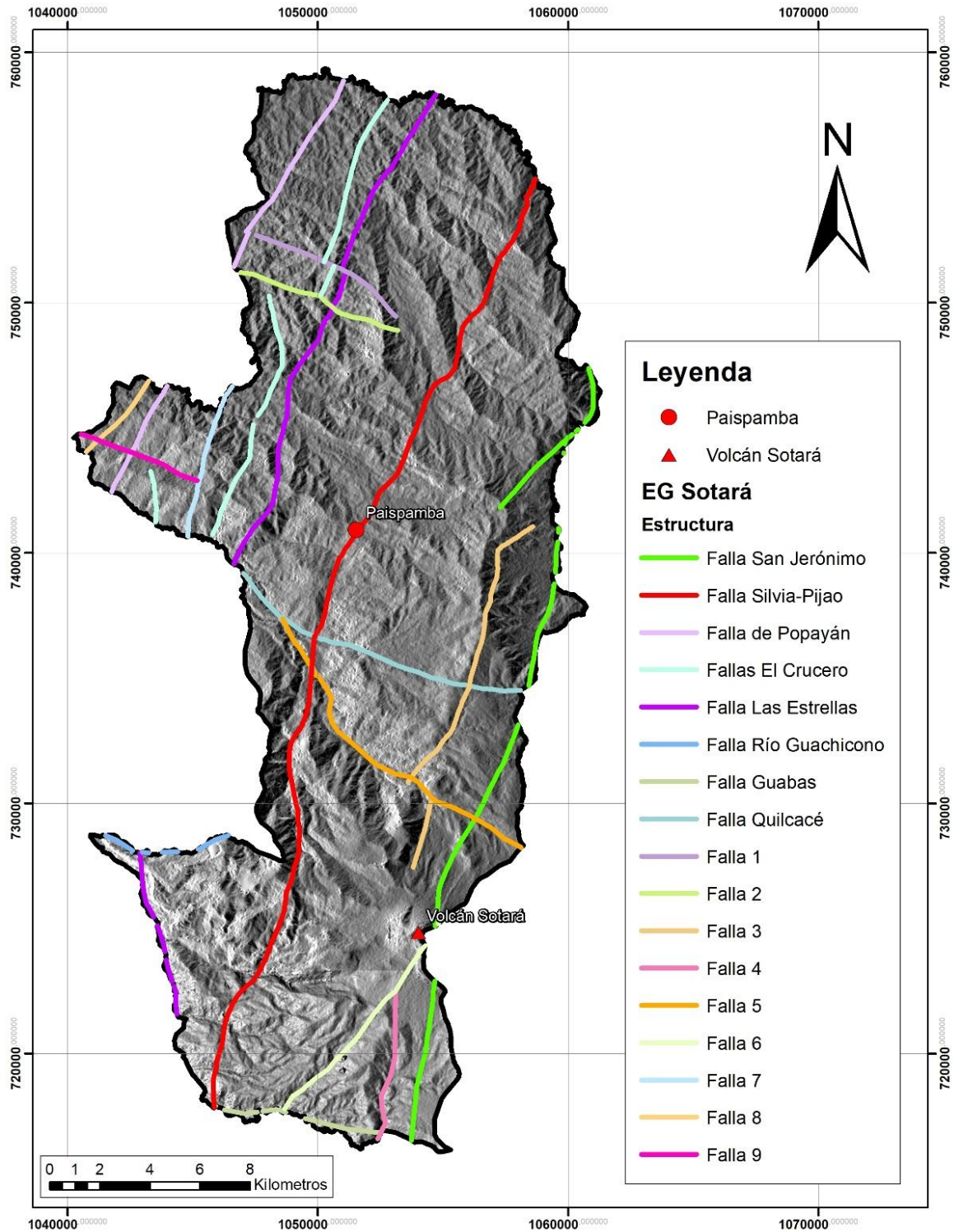


Figura 12. Distribución de las estructuras geológicas presentes en el municipio de Sotará.

Fuente: Propia a partir de la información de Cruz et al. (2021a).

4.3. Volcanismo cuaternario

El análisis del volcanismo cuaternario se llevará a cabo a partir de la información de los depósitos volcánicos recientes presentes en las áreas de estudio. Según Aguilera et al. (2014), estos depósitos constituyen un indicador de la proximidad a los centros eruptivos y permiten definir un grado de favorabilidad para sistemas geotérmicos con base en su volumen o extensión, y su composición.

4.3.1. Volcanismo cuaternario en el municipio de Puracé

La Tabla 7 muestra las unidades geológicas correspondientes a depósitos volcánicos de edad cuaternaria presentes en el municipio de Puracé, tomadas de Marquínez et al. (2003).

Tabla 7. Unidades volcánicas recientes en el municipio de Puracé.

Código	Nombre	Litología/Composición	Edad
Qp	Formación Coconucos - Miembro Puracé	Flujos de ceniza	Cuaternario
Qplv	Formación Popayán - Miembro La Venta	Flujos de ceniza y cenizas de caída. Composición andesítico	Pleistoceno
Qpt	Formación Coconucos - Miembro Paletará	Flujos de ceniza	Neógeno - Cuaternario
Qsf	Formación Coconucos - Miembro San Francisco	Ceniza y escoria, con zonas de flujo	Neógeno - Cuaternario
Qc	Formación Popayán	Depósitos de cenizas o tefras. Composición andesítico	Plioceno - Cuaternario
Qlb	Lavas Laguna del Buey (fm. Coconucos)	Flujos de lava andesítica.	Cuaternario
Qls	Lavas Santa Leticia	Flujos de lava andesítica.	Cuaternario
Qsh	Formación Coconucos - Miembro Shaka	Lavas recientes de la Cadena Volcánica Los Coconucos	Neógeno - Cuaternario
Qc	Formación Popayán	Depósitos de cenizas o tefras	Plioceno - Cuaternario
NgQf	Vulcanitas del Galeón	Depósitos de lahares correspondientes a flujos piroclásticos removidos	Neógeno - Cuaternario

Fuente: Marquínez et al. (2003).

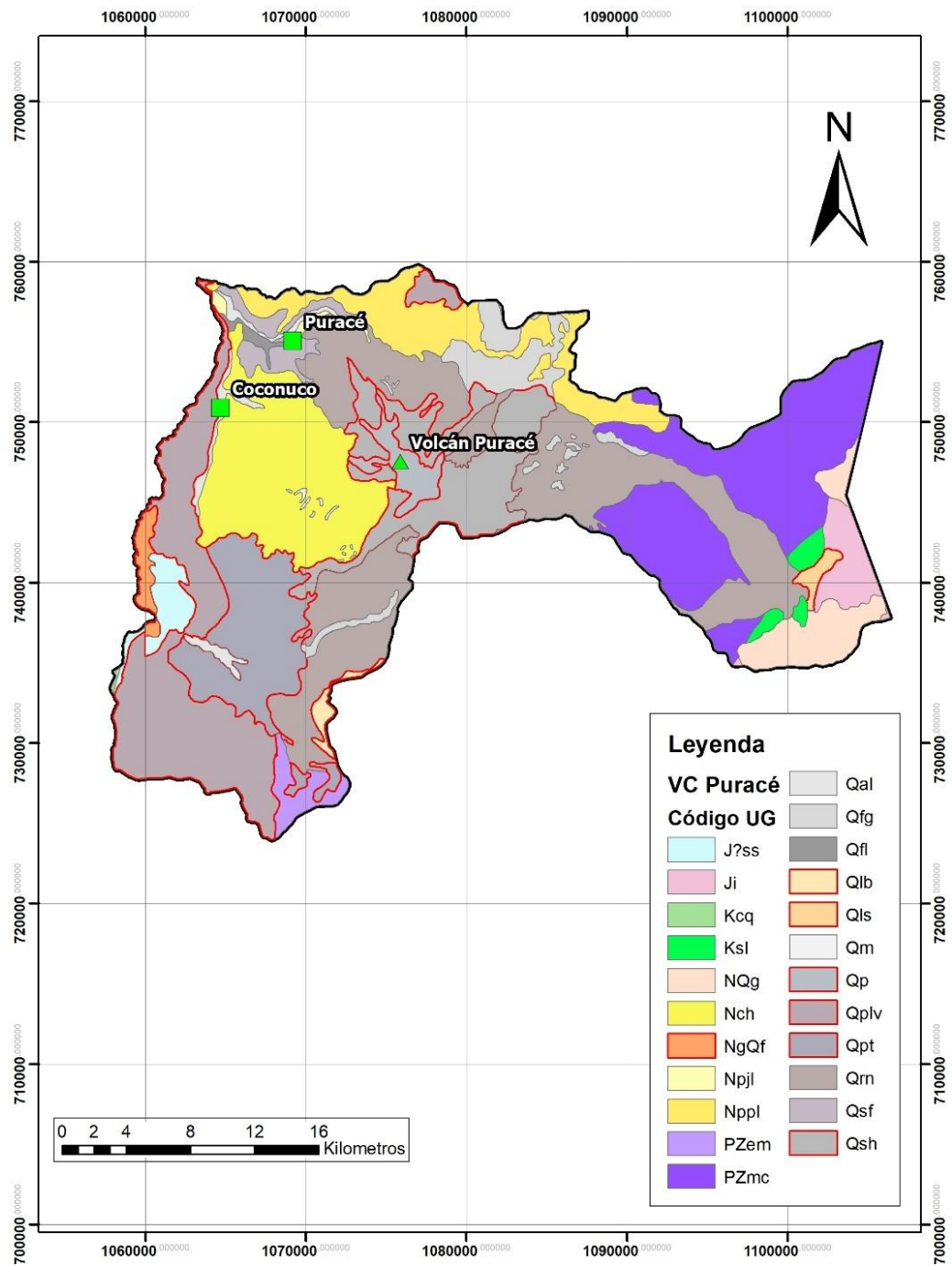


Figura 13. Distribución de las unidades volcánicas recientes en el municipio de Puracé.

Fuente: Propia a partir de la información de Marquínez et al. (2003).

La Figura 13 muestra la distribución de los depósitos volcánicos recientes en el municipio de Puracé (unidades marcadas en contorno de color rojo).

4.3.2. Volcanismo cuaternario en el municipio de Sotará

La Tabla 8 muestra las unidades geológicas correspondientes a depósitos volcánicos de edad cuaternaria presentes en el municipio de Sotará, tomadas de Cruz et al. (2021a).

Tabla 8. Unidades volcánicas recientes en el municipio de Puracé.

Código	Nombre/Litología	Edad
Rrca	Roca de calidad regular de obsidiana Cerro Azafatudo	Pleistoceno
Rrcpd	Roca de calidad regular Cierra Puertas - El Diviso	Pleistoceno
Rrdc	Roca de calidad regular Unidad Eruptiva Domo Colada	Holoceno
Rrde	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva Domos Externos	Holoceno
Rriea	Roca de calidad regular ignimbrita soldada El Auca	Pleistoceno
Rrifp	Rocas de calidad regular de ignimbritas de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario
Rrlc	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva La Corona	Holoceno
Rrlcg	Roca de calidad regular lavas Cerro Gordo	Holoceno
Rrls	Roca de calidad regular Unidad Eruptiva Lavas de los Domos Somitales	Holoceno
Rrs	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva Sucubún	Pleistoceno
Rrsr	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva San Roque	Pleistoceno
Rrcn	Roca de calidad regular lavas Cerro Negro	Pleistoceno
Srdifp	Suelo residual de depósito de ignimbrita de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario
Srea	Suelo residual de depósito de ignimbrita soldada El Auca	Pleistoceno

Código	Nombre/Litología	Edad
Srfp	Suelo residual de depósitos volcaniclásticos de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario
Srvlc	Suelo residual de depósito volcaniclástico Las Cabras	Holoceno
Staerb	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica Río Rioblanco	Pleistoceno
Staern	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica y lahar Río Negro	Holoceno
Stc	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Chapa	Pleistoceno
Stcv	Suelo transportado volcaniclástico Casa Vieja	Pleistoceno
Steb	Suelo transportado volcaniclástico Unidad eruptiva El Barrial	Pleistoceno
Stfvlc	Suelo transportado por flujos volcaniclásticos Las Cabras	Holoceno
Stla	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Los Alisales	Pleistoceno
Stlc	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Las Cabras	Holoceno
Stlcu	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Cueva	Holoceno
Stlp	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Piedra	Holoceno
Stlpa	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Paila	Holoceno
Stlsy	Suelo transportado volcaniclástico Unidades Eruptivas Llano de Sotará y Unidad Eruptiva Yerbabuena	Pleistoceno
Stlv	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Las Vegas	Holoceno
Stq	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Quilcacé	Holoceno
Sts1	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Sucubún 1	Pleistoceno
Stvi	Suelo transportado de depósito volcaniclástico indiferenciado	Cenozoico
Sty	Suelo transportado por flujos volcaniclásticos Yerbabuena	Pleistoceno

Fuente: Cruz et al. (2021a).

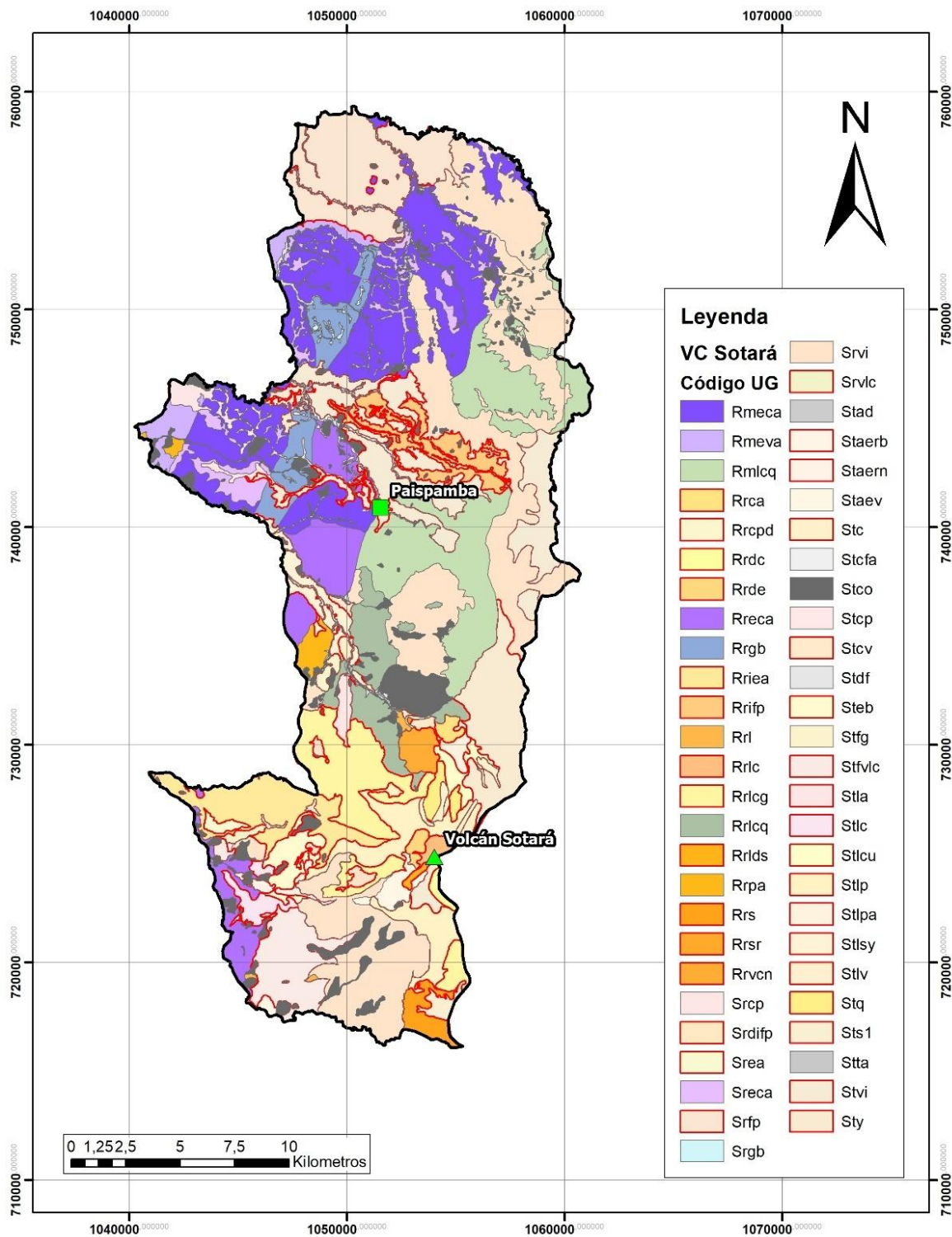


Figura 14. Distribución de las unidades volcánicas recientes en el municipio de Sotará.

Fuente: Propia a partir de la información de Cruz et al. (2021a).

La Figura 14 muestra la distribución de los depósitos volcánicos recientes en el municipio de Sotará (unidades marcadas en contorno de color rojo).

4.4. Geoquímica de manifestaciones termales

La geoquímica de los manantiales termales corresponde a la fuente de información más certera respecto al fenómeno geotermal, ya que corresponde a las manifestaciones termales superficiales asociadas a los sistemas geotérmicos en profundidad (Lemus et al, 2015). Según Aguilera et al. (2014), la composición química permite establecer las condiciones fisicoquímicas profundas del sistema usando cálculos geotermométricos, por lo tanto, la ubicación y temperatura profunda calculada son parámetros principales en la evaluación de la favorabilidad geotérmica.

4.4.1. Geoquímica de manifestaciones termales en el municipio de Puracé

Se han identificado numerosos manantiales termales en el municipio de Puracé, dentro del área de influencia del sistema volcánico Puracé. En Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018a) se realiza una agrupación de los manantiales termales con respecto a las subcuencas hidrográficas en las que se encuentran ubicados. La Figura 15 muestra la distribución y agrupamiento de los manantiales termales asociados al sistema volcánico de Puracé.

Dentro de la agrupación propuesta por Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018b) se tomó la información de los grupos que se encuentran dentro del área del municipio de Puracé, los cuales son el A, B y C.

Según la caracterización fisicoquímica y los análisis geotermométricos, para las fuentes termales del sistema geotérmico del grupo Puracé-Cononuco se propone un sistema de alta entalpía (212 a 229 °C), con base en geotermómetros acuosos de sílice y alcalinos. Sin embargo, para el manantial Aguahirviendo, que es el más representativo del fluido del reservorio para los manantiales del grupo A, se obtuvo una temperatura mínima de 150 °C por medio del

geotermómetro de sílice y una temperatura máxima promedio de 220 °C de acuerdo con los geotermómetros alcalinos (Alfaro, 2013).

A continuación, se muestran los resultados de las temperaturas profundas calculadas por medio de geotermómetros de sílice (ver

Tabla 9) y geotermómetros alcalinos (ver Tabla 10) en los manantiales termales de los grupos A y C, según Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018b).

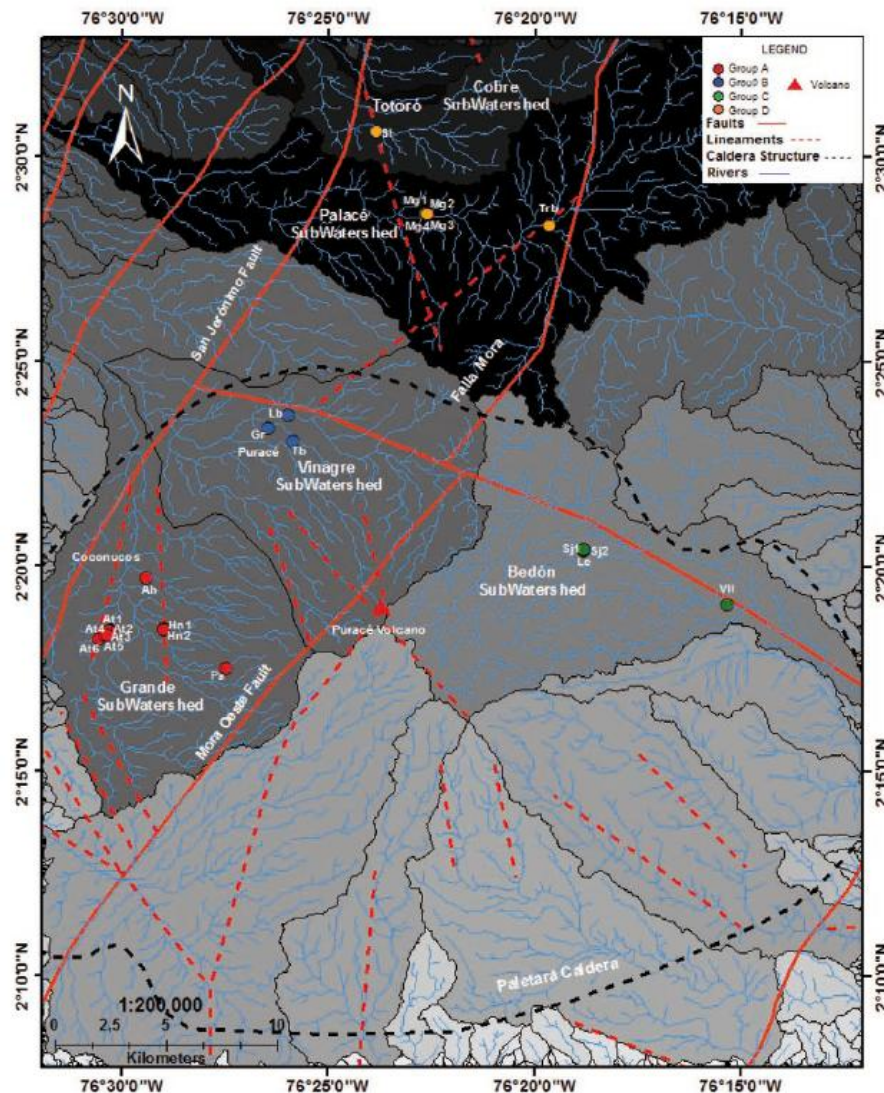


FIGURE 3. Subwatershed delimitation at the PVS with sample locations and geological structures.

Figura 15. Agrupamiento de los manantiales termales asociados al sistema volcánico de Puracé, con base en las subcuencas hidrográficas en las que se ubican.

Fuente: Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018a).

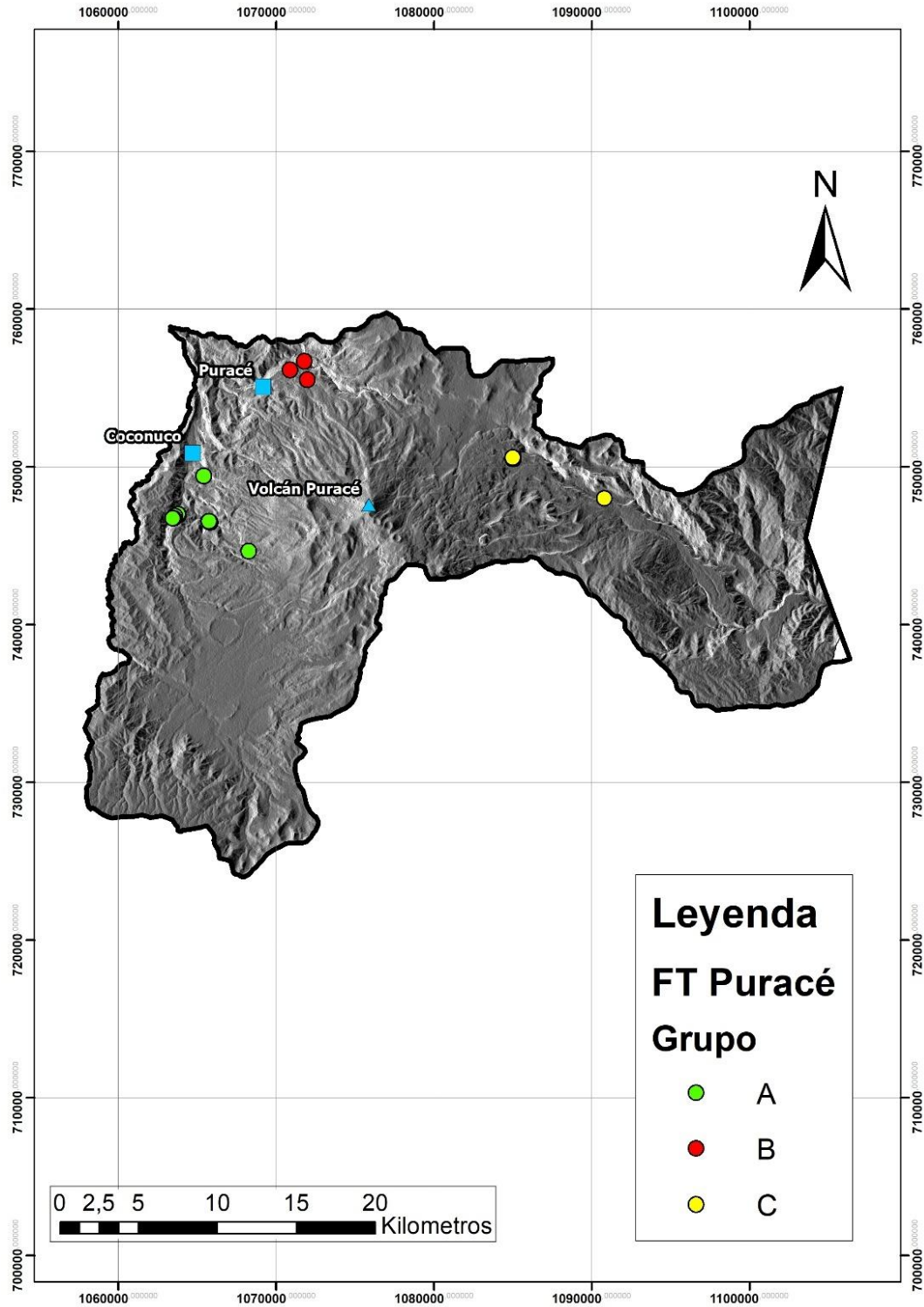


Figura 16. Distribución de los manantiales termales asociados al sistema volcánico de Puracé.

Fuente: Propia a partir de Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018a).

Tabla 9. Temperaturas profundas obtenidas a partir de geotermómetros de sílice para los manantiales del municipio de Puracé.

Grupo	Nombre	T (°C) calculadas a partir de geotermómetros de sílice			
		α Cristobalita	Calcedonia	Cuarzo	Cuarzo adiabático
A	Balneario Aguatibia (1)	91	115	141	136
	Balneario Aguatibia (2)	101	126	152	145
	Balneario Aguatibia (3)	108	135	159	151
	Balneario Aguatibia (4)	116	143	167	157
	Balneario Aguatibia (5)	97	122	148	141
	Balneario Aguatibia (6)	98	124	149	143
	Aguahirviendo	99	125	150	143
	Los Hornos (1)	142	172	192	177
	Los Hornos (2)	143	173	193	178
C	Laguna Esmeralda	100	125	150	144
	Manantiales de San Juan (1)	85	109	136	132
	Manantiales de San Juan (2)	90	114	140	135
	Termales Versailles*		135	159	

Fuente: Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018b). *La información para el manantial de Versailles fue tomada de Alfaro (2013).

Tabla 10. Temperaturas profundas obtenidas a partir de geotermómetros alcalinos para los manantiales del municipio de Puracé.

Grupo	Nombre	T (°C) calculadas a partir de geotermómetros alcalinos						
		Na-K-Ca	Na-K-Ca Mg	Na/K	Na/K	Na/K	Na/K	K/Mg
A	Balneario Aguatibia (1)	111	31	320	327	327	382	74
	Balneario Aguatibia (2)	211	32	270	257	281	301	87
	Balneario Aguatibia (3)	210	33	266	252	278	296	88
	Balneario Aguatibia (4)	157	87	143	99	162	124	109
	Balneario Aguatibia (5)	217	25	307	308	315	360	77
	Balneario Aguatibia (6)	189	30	226	199	241	236	83
	Aguahirviendo	212	90	213	183	229	218	134
	Los Hornos (1)	230	116	267	252	278	296	125
	Los Hornos (2)	224	21	249	229	262	270	103
C	Laguna Esmeralda	44	44	276	265	287	311	49
	Manantiales de San Juan (1)	38	38	242	219	255	259	45
	Manantiales de San Juan (2)	163	45	158	116	176	143	99
	Termales Versailles*	168						

Fuente: Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018b). *La información para el manantial de Versailles fue tomada de Alfaro (2013).

Según Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018b), los manantiales del grupo B presentan un desbalance iónico, que puede deberse a un error en la toma de la muestra o a la alta acidez de las aguas, por lo cual se descartó para este análisis. Sin embargo, en Alfaro (2013) se menciona que, para los manantiales ácidos de la Mina el Vinagre, que se encuentran muy cerca de los manantiales del grupo B, se aplicó el geotermómetro Na/K/Ca, obteniendo valores del orden de 215 °C. Para el análisis de favorabilidad se tomará este valor como referencia para la temperatura profunda del grupo B, debido a que estos manantiales se encuentran en la subcuenca del río Vinagre, al igual que los manantiales de la Mina el Vinagre.

4.4.2. Geoquímica de manifestaciones termales en el municipio de Sotará

Según la información recopilada, en el municipio de Sotará se han identificado únicamente 2 manantiales termales (Las Amarillas y Las Chizas) en cercanías al complejo volcánico Sotará. La Figura 17 muestra la ubicación de estas manifestaciones dentro del municipio de Sotará.

Según Alfaro (2013), en el manantial termal Aguas Amarillas, se estimó una temperatura de 177 °C, con base en el geotermómetro de cuarzo sin pérdida de vapor y de 82 °C a partir del geotermómetro Na-K-Ca. También se menciona que, teniendo en cuenta la confiabilidad del geotermómetro de sílice, afectado básicamente por dilución a condiciones de pH neutro, se asume que la temperatura del reservorio que alimenta el manantial es como mínimo de 177 °C. En Pabón et al. (2019) se hace énfasis en el estudio del manantial termal Las Chizas - Salinas, pero dentro de la caracterización no se cuenta con información de temperaturas profundas obtenidas por medio de geotermómetros. Debido a esto, para el análisis de favorabilidad se cuenta con información únicamente del manantial termal Las Amarillas.

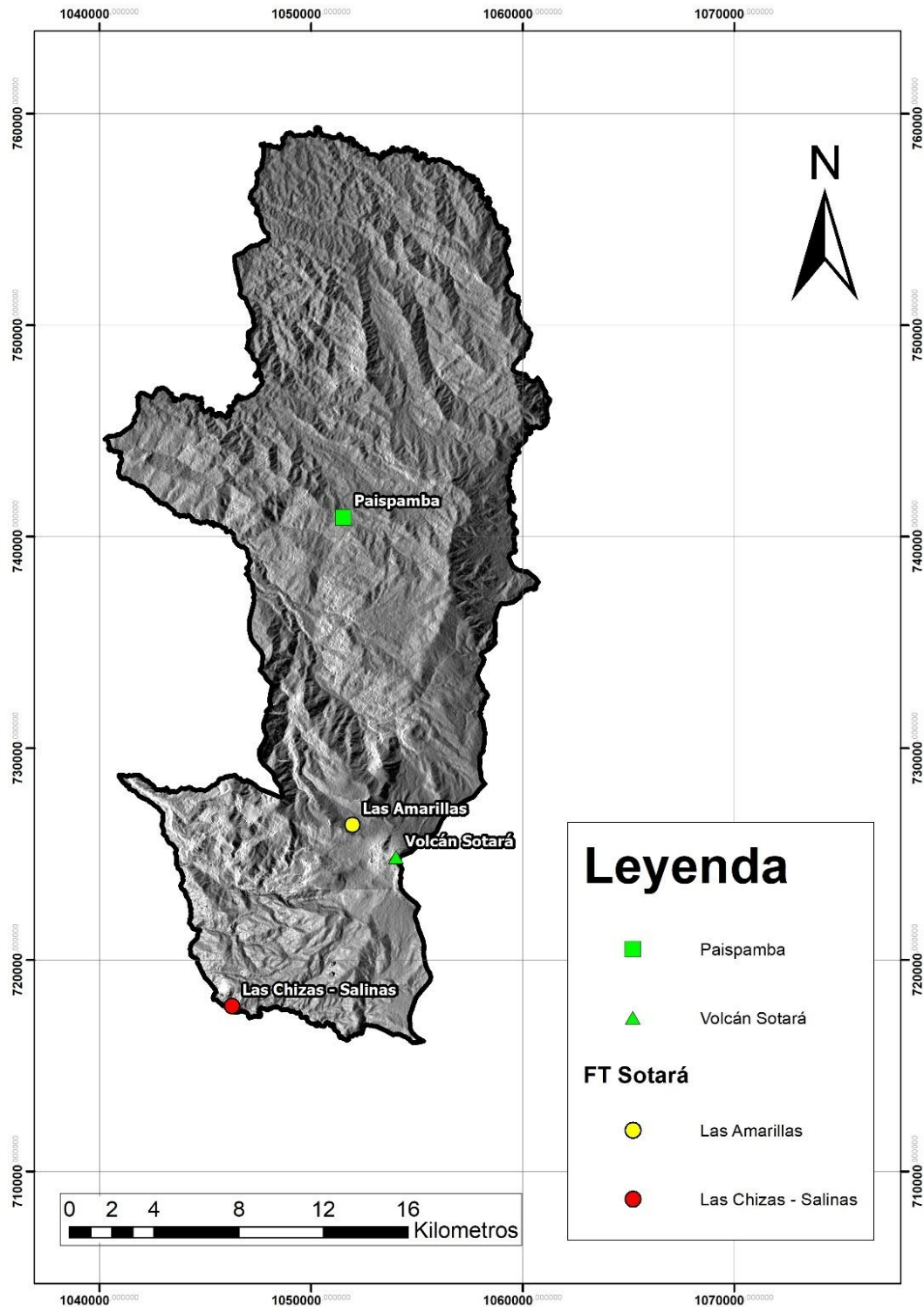


Figura 17. Distribución de los manantiales termales asociados al sistema volcánico de Sotarà.

Fuente: Propia a partir de Alfaro (2013) y Pabón et al. (2019).

5. Procesamiento y análisis de variables geotérmicas, cálculo y obtención de la favorabilidad geotérmica

5.1. Consideraciones generales

Se evaluaron los distintos factores geológicos, estructurales, geoquímicos y volcánicos en los municipios de Puracé y Sotará, con el objetivo de determinar áreas más favorables para la exploración geotérmica. Según Aguilera et al. (2014), la integración de estos datos permite establecer correlaciones entre la presencia de estructuras tectónicas activas, unidades geológicas, manifestaciones termales y actividad volcánica reciente, proporcionando una base para la delimitación de zonas con condiciones favorables para albergar un reservorio geotérmico. Con base en esta información, se determinó que el sistema geotérmico tanto para el área de influencia del municipio de Puracé como para el municipio de Sotará corresponden a sistemas de media a alta entalpía, caracterizadas por la presencia de una fuente de calor asociada a cuerpos magmáticos que alimentan el volcanismo actual.

Las manifestaciones termales es uno de los parámetros principales en la evaluación de la favorabilidad geotérmica en las áreas de estudio (Puracé y Sotará), pues según Aguilera et al. (2014), éstas representan una evidencia de un posible sistema hidrotermal en profundidad. Parámetros como la composición química y las condiciones fisicoquímicas de las fuentes termales permiten estimar la temperatura en profundidad mediante técnicas como la geotermometría y el origen/mezcla de las aguas por medio de análisis isotópico.

Según Aguilera et al. (2014), las unidades geológicas con mayor permeabilidad primaria presentan mejores condiciones hidráulicas para albergar fluidos hidrotermales. De esta forma, la distribución de unidades que presentan características hidrogeológicas similares es indicador de favorabilidad de zonas profundas permeables capaces de albergar reservorios hidrotermales. Con

base en la metodología aplicada en Aguilera et al. (2014), las unidades geológicas se agrupan según sus características litológicas e hidráulicas dentro de un rango de edad, lo último debido a que las rocas más antiguas tienen un grado de litificación mayor, y por ende una menor permeabilidad.

Con base en estos criterios se definen los siguientes niveles de favorabilidad:

Tabla 11. Criterios de favorabilidad geológica.

Tipo de unidad geológica	% Favorabilidad
Unidades intrusivas	0%
Lavas antiguas	10%
Lavas recientes	20%
Rocas sedimentarias paleozóicas	40%
Rocas volcano sedimentarias mesozóicas	60%
Rocas sedimentarias mesozóicas	80%
Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100%

Fuente: Aguilera et al. (2014)

Las estructuras geológicas son consideradas por Aguilera et al. (2014) como zonas de debilidad que facilitan la circulación de fluidos en la corteza superior, las que adicionalmente imprimen a las unidades geológicas una permeabilidad de carácter secundario. Con base en esto, se definen un rango de importancia según la extensión espacial de la estructura y su régimen dinámico (Compresivo y extensivo) de la siguiente manera:

Tabla 12. Criterios de favorabilidad estructural.

Orden Estructura	Extensión	Régimen de esfuerzos	Grupo de clasificación	Frecuencia
0	>100 km	Extensivo	0E	6
		Compresivo	0C	5
1	Entre 10 y 100 km	Extensivo	1E	4
		Compresivo	1C	2
2	< 10 km	Extensivo	2E	3
		Compresivo	2C	1

Fuente: Aguilera et al. (2014).

La favorabilidad estructural se estima en Aguilera et al. (2014) a través de un mapa de densidad de fallas, utilizando los criterios mencionados en la Tabla 12 para ponderar y obtener un grado de favorabilidad para cada estructura. El resultado es un mapa pixelado o rasterizado en el cual cada

píxel representa la cantidad de fallas por km². Finalmente, los resultados en unidades de fallas por km² se re-escalan a un rango de 0 a 100% de favorabilidad.

Según Aguilera et al. (2014), los sistemas geotermales asociados al volcanismo reciente se distinguen por tener como fuente de calor al magma que alimenta la actividad volcánica reciente o actual. Por ello, la proximidad a volcanes activos es un factor clave para su desarrollo.

La favorabilidad basada en los depósitos volcánicos recientes (edad cuaternaria) se define en Aguilera et al. (2014) de acuerdo con el volumen o extensión de los depósitos volcánicos cuaternarios, su composición y el registro de su actividad volcánica, de la siguiente manera:

Tabla 13. Criterios de favorabilidad volcanológica.

Favorabilidad volcanológica		
Unidad	Tipo de roca	% Favorabilidad
Q(P)vc	Unidad volcánica basal preglaciar	20%
Q(P)v	Unidad volcánica preglaciar	30%
Q(P)va	Unidad volcánica preglaciar ácida	40%
Qav	Depósito de avalancha volcánica postglaciar	50%
Qlv	Depósito lahárico postglaciar	60%
Qv	Unidad volcánica indiferenciada postglaciar	70%
Qva	Unidad volcánica postglaciar ácida	80%
Qvc	Unidad piroclástica reciente	90%
Qvh	Depósitos asociados a erupciones históricas postglaciares	100%

Fuente: Aguilera et al. (2014).

Finalmente, luego de obtener los niveles de favorabilidad para cada uno de los parámetros considerados (geoquímica, estructuras geológicas, unidades geológicas y volcanismo reciente), se realiza la integración de toda esta información mediante los criterios enunciados a continuación, realizando la suma ponderada de los cuatro parámetros y obteniendo un modelo de favorabilidad general cada zona de interés. El peso ponderado para cada factor, según Aguilera et al. (2014) es:

Tabla 14. Factores de ponderación para los parámetros de favorabilidad

Parámetro	% Favorabilidad
Geoquímica	40
Estructuras geológicas	30
Unidades geológicas	20

Parámetro	% Favorabilidad
Volcanismo reciente	10

Fuente: Aguilera et al. (2014).

A partir de los criterios mencionados anteriormente, se clasifica la información obtenida para los municipios de Puracé y Sotará con el fin de evaluar el recurso geotérmico.

5.2. Análisis de los recursos geotérmicos en el municipio de Puracé

5.2.1. Geoquímica de manifestaciones termales en superficie

Con base en la información recopilada sobre los estudios geoquímicos realizados a los manantiales termales en el municipio de Puracé, se definió la favorabilidad geoquímica a partir del promedio de las temperaturas profundas obtenidas con los diferentes geotermómetros aplicados para los manantiales termales del grupo A y C, y para los manantiales termales del grupo B se tomó como referencia la temperatura promedio de reservorio estimada, como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Temperatura profunda estimada para los manantiales termales del municipio de Puracé.

Grupo	Nombre	Temperatura profunda promedio (°C)
A	Balneario Aguatibia (1)	187
	Balneario Aguatibia (2)	178
	Balneario Aguatibia (3)	180
	Balneario Aguatibia (4)	133
	Balneario Aguatibia (5)	192
	Balneario Aguatibia (6)	156
	Aguahirviendo	163
	Los Hornos (1)	204
	Los Hornos (2)	186
B	Tabio	215
	Guarquelló	
	La Bajada	
C	Laguna Esmeralda	163
	Manantiales de San Juan (1)	142
	Manantiales de San Juan (2)	125
	Termales Versalles	154

Fuente: Propia a partir de Gómez-Díaz & Marin-Cerón (2018b) y Alfaro (2013).

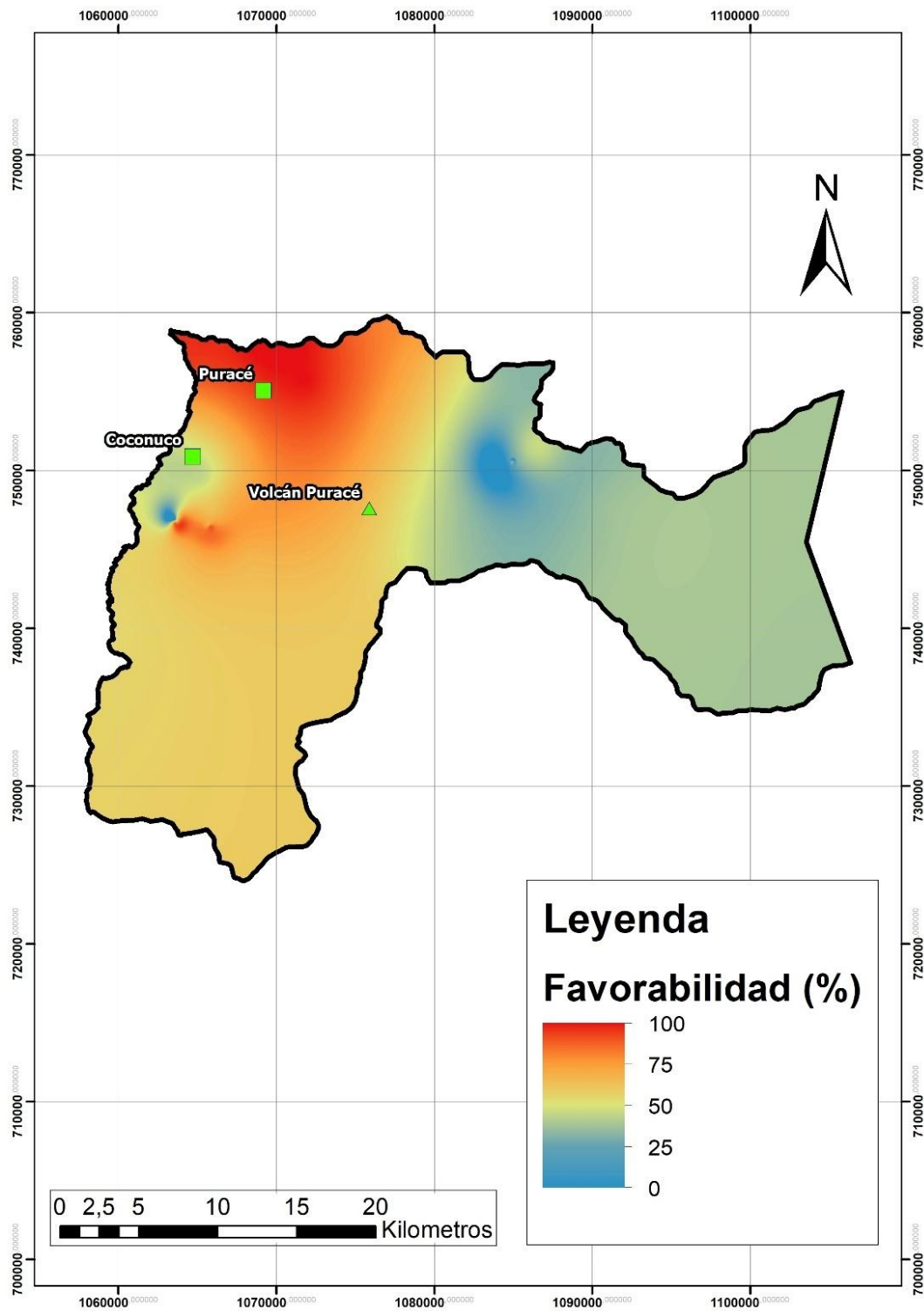


Figura 18. Mapa de favorabilidad geoquímica generado a partir de la interpolación de las temperaturas profundas promedio para las manifestaciones termales del municipio de Puracé.

Se aplicó la metodología propuesta por Aguilera et al. (2014), realizando una interpolación tipo spline de las manifestaciones termales tomando como parámetros de peso la temperatura profunda máxima calculada, por medio del software ArcGIS. La Figura 18 muestra la distribución de los manantiales termales, respectivamente agrupados y la distribución de las temperaturas en profundidad obtenidas.

5.2.2. Geología del municipio de Puracé

A partir del criterio de favorabilidad para las unidades geológicas, se estableció la siguiente clasificación para las unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé.

Tabla 16. Clasificación de las unidades geológicas del municipio de Puracé con base en los criterios de favorabilidad geológica.

Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé					
Código	Nombre	Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
J?ss	Secuencia sedimentaria rojiza	Conglomerados, areniscas cuarzosas, limolitas y arcillolitas	Jurásico	Rocas sedimentarias Mesozoicas	80
Ji	Batolito de Ibagué (Batolito de Páez, Macizo de la Plata-La Topa, Granitoide de La Plata)	Cuerpo intrusivo de composición entre granito, granodiorita, cuarzomonzodiorita y monzodiorita.	Jurásico	Unidad geológica intrusiva	0
Ksl	Sedimentitas Santa Leticia	Sucesión de cuarzoarenitas intercaladas con capas de lodolitas carbonosas.	Cretácico	Rocas sedimentarias Mesozoicas	80
NQg	Formación Guacacallo	Constituida principalmente por tobas predominantemente vítreas.	Neógeno (Plioceno tardío)	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Nch	Formación Coconucos - Miembro Chagartón	Depósitos de flujos de lava masivos a columnares	Neógeno - Cuaternario	Lavas recientes	20
NgQf	Depósitos de lahares	Lahares correspondientes a flujos piroclásticos removidos, con fragmentos de rocas volcánicas y madera carbonizada.	Neógeno-Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100

Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé					
Código	Nombre	Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Npjl	Formación Popayán - Miembro Julumito	Depósitos de ignimbritas con textura porfírica	Neógeno	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Nppl	Formación Popayán - Miembro Polindara	Flujos de lava andesítica.	Neógeno	Lavas recientes	20
Pzem	Esquistos Mazamoras	Esquistos de color verde y negro, cuarzo micáceos y cuarcitas	Paleozóico temprano	Unidad geológica intrusiva	0
PZmc	Complejo Cajamarca	Esquistos de color verde y negro, cuarzo micáceos y cuarcitas, filitas grafitosas y calcáreas, metalimolitas, metachert y esquistos sericiticos.	Paleozóico temprano - Cretácico	Unidad geológica intrusiva	0
Qal	Depósitos aluviales	Gravas, arenas y arcillas asociados a cauces actuales y márgenes de los principales drenajes de los dos flancos de la cordillera central.	Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Qfg	Depósitos fluvioglaciares	Sin descripción	Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Qfl	Depósitos fluviolacustres	Sin descripción	Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Qlb	Lavas Laguna del Buey	Flujos de lava andesítica.	Cuaternario	Lavas recientes	20
Qls	Lavas Santa Leticia	Flujos de lava andesítica.	Cuaternario	Lavas recientes	20
Qm	Depósitos morrénicos	Sin descripción	Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Qp	Formación Coconucos - Miembro Puracé	Flujos de ceniza	Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	0

Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé					
Código	Nombre	Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Qplv	Formación Popayán - Miembro La Venta	Flujos de ceniza y cenizas de caída	Pleistoceno	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Qpt	Formación Coconucos - Miembro Paletará	Flujos de ceniza	Neógeno - Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Qsf	Formación Coconucos - Miembro San Francisco	Ceniza y escoria, con zonas de flujo	Neógeno - Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
Qsh	Formación Coconucos - Miembro Shaka	Lavas recientes de la Cadena Volcánica Los Coconucos	Neógeno - Cuaternario	Lavas recientes	20
Qc	Formación Popayán	Depósitos de cenizas o tefras	Plioceno - Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
NgQf	Vulcanitas del Galeón	Depósitos de lahares correspondientes a flujos piroclásticos removidos	Neógeno - Cuaternario	Rocas volcano-sedimentarias Cenozoicas	100
J?ss	Secuencia sedimentaria rojiza	Conglomerados, areniscas cuarzosas, limolitas y arcillolitas	Jurásico	Rocas sedimentarias Mesozoicas	80
Kcq	Complejo Quebrada Grande	Sedimentitas (limolitas, arcillolitas, grauvacas conglomeráticas y conglomerados grauváquicos) y flujos basálticos	Cretácico	Rocas volcano-sedimentarias Mesozoicas	60

Fuente: Propia a partir de Marquinez et al. (2003).

La Figura 19 muestra los resultados de favorabilidad geológica del municipio de Puracé. Se observan zonas con alta favorabilidad que corresponden a unidades volcano sedimentarias de edad cenozoicas, y la presencia de unidades como lavas y depósitos volcano sedimentarios recientes (no consolidados) hacia la zona donde se encuentra la Cadena Volcánica Los Coconucos que, a pesar de que proporcionan un bajo porcentaje de favorabilidad en cuanto al factor geológico, es un

indicativo de la actividad volcánica reciente y que será considerado en la evaluación del parámetro de volcanismo reciente.

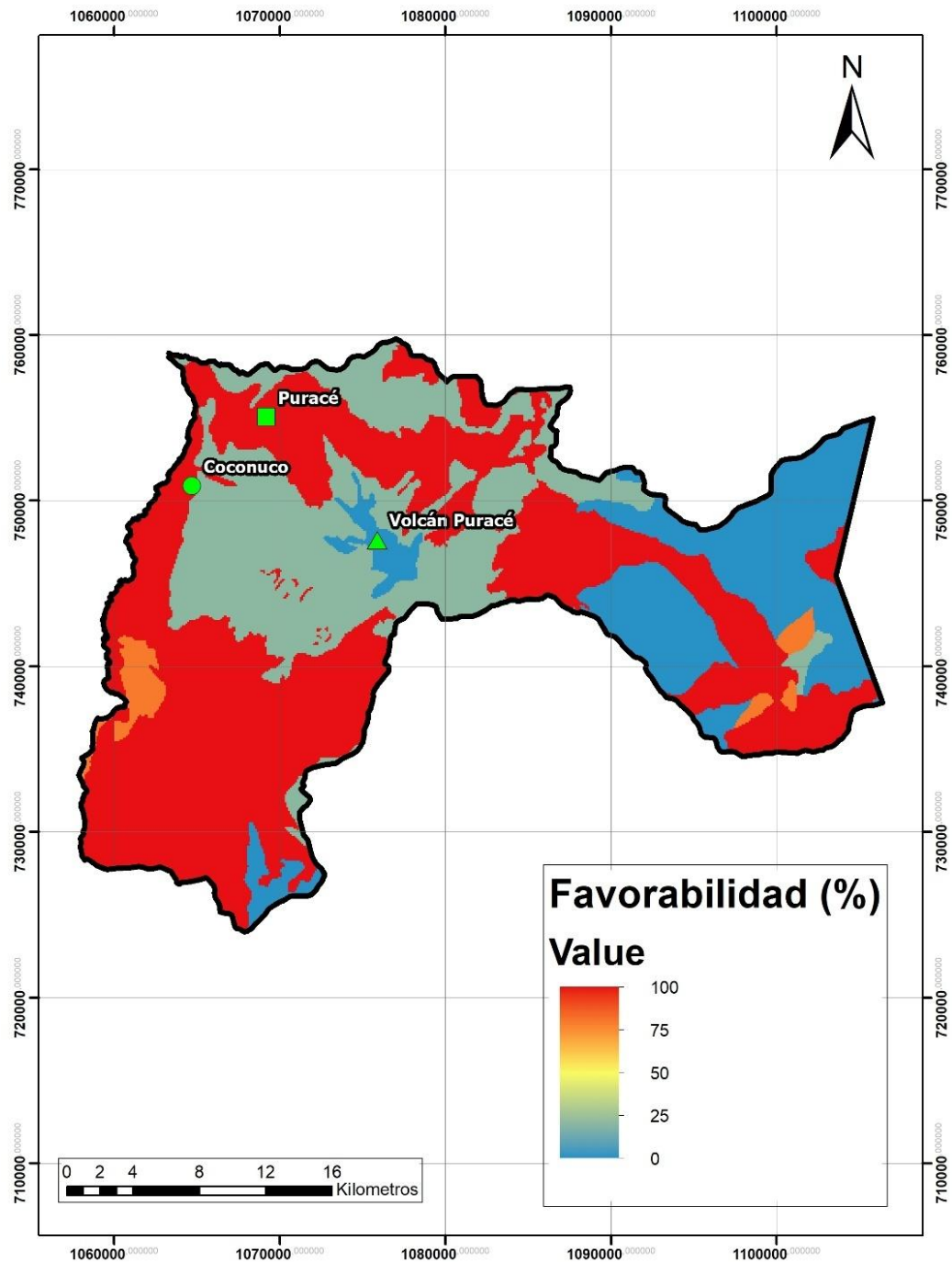


Figura 19. Mapa de favorabilidad geológica generado a partir de las unidades geológicas del municipio de Puracé.

5.2.3. Estructuras geológicas en el municipio de Puracé

A partir del criterio de favorabilidad para las estructuras geológicas, se estableció la siguiente clasificación para las estructuras geológicas presentes en el municipio de Puracé.

Tabla 17. Clasificación de las estructuras geológicas del municipio de Puracé con base en los criterios de favorabilidad estructural.

Estructuras geológicas presentes en el municipio de Puracé				
Estructura	Extensión (km)	Régimen de esfuerzos	Orden	Frecuencia
Falla Silvia-Pijao	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla de Moras	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla de Moras Oeste	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla de Moras Este	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla de Coconucos	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla San Jerónimo	>100 km	Compresivo	0C	5
Falla de Inzá	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla 1	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2

Fuente: Propia a partir de Marquinez et al. (2003).

La Figura 20 muestra los resultados de favorabilidad estructural del municipio de Puracé. Se observan zonas de alta favorabilidad principalmente sobre el trazo de la falla de San Jerónimo, debido a que es una falla de carácter regional que podría favorecer la circulación de fluidos a profundidades altas, y en un punto que posee una alta densidad de líneas que corresponde a la intersección de la falla Coconucos con las fallas Moras Este y Moras Oeste, y a su vez coincide con la ubicación del volcán Puracé y la cadena volcánica Los Coconucos, que representan las estructuras volcánicas activas o con actividad reciente en la zona.

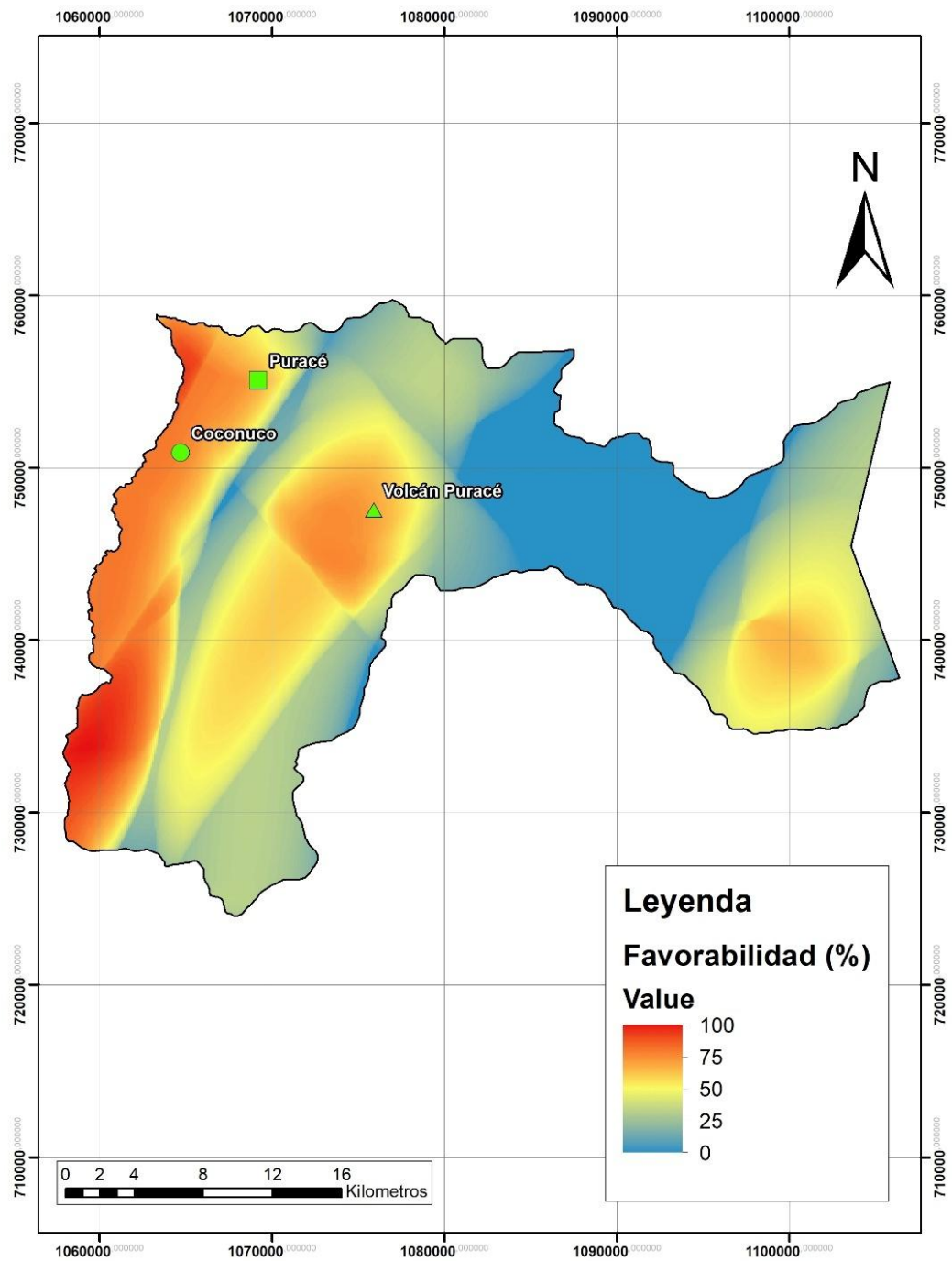


Figura 20. Mapa de favorabilidad estructural generado a partir de las estructuras geológicas del municipio de Puracé.

5.2.4. Volcanismo cuaternario en el municipio de Puracé

A partir del criterio de favorabilidad volcanológica, se estableció la siguiente clasificación para las unidades volcánicas recientes presentes en el municipio de Puracé.

Tabla 18. Clasificación de las unidades volcánicas recientes del municipio de Puracé con base en los criterios de favorabilidad de volcanismo cuaternario.

Depósitos volcánicos recientes en el municipio de Puracé					
Código	Nombre	Litología/Composición	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Qp	Formación Coconucos - Miembro Puracé	Flujos de ceniza	Cuaternario	Qvh	100
Qplv	Formación Popayán - Miembro La Venta	Flujos de ceniza y cenizas de caída. Composición andesítico	Pleistoceno	Q(P)v	30
Qpt	Formación Coconucos - Miembro Paletará	Flujos de ceniza	Neógeno - Cuaternario	Q(P)vc	20
Qsf	Formación Coconucos - Miembro San Francisco	Ceniza y escoria, con zonas de flujo	Neógeno - Cuaternario	Q(P)v	30
Qc	Formación Popayán	Depósitos de cenizas o tefras. Composición andesítico	Plioceno - Cuaternario	Q(P)v	30
Qlb	Lavas Laguna del Buey (fm. Coconucos)	Flujos de lava andesítica.	Cuaternario	Qv	70
Qls	Lavas Santa Leticia	Flujos de lava andesítica.	Cuaternario	Qv	70
Qsh	Formación Coconucos - Miembro Shaka	Lavas recientes de la Cadena Volcánica Los Coconucos	Neógeno - Cuaternario	Qvh	100
Qc	Formación Popayán	Depósitos de cenizas o tefras	Plioceno - Cuaternario	Q(P)v	30
NgQf	Vulcanitas del Galeón	Depósitos de lahares correspondientes a flujos piroclásticos removidos	Neógeno - Cuaternario	Qlv	60

Fuente: Propia a partir de Marquinez et al. (2003).

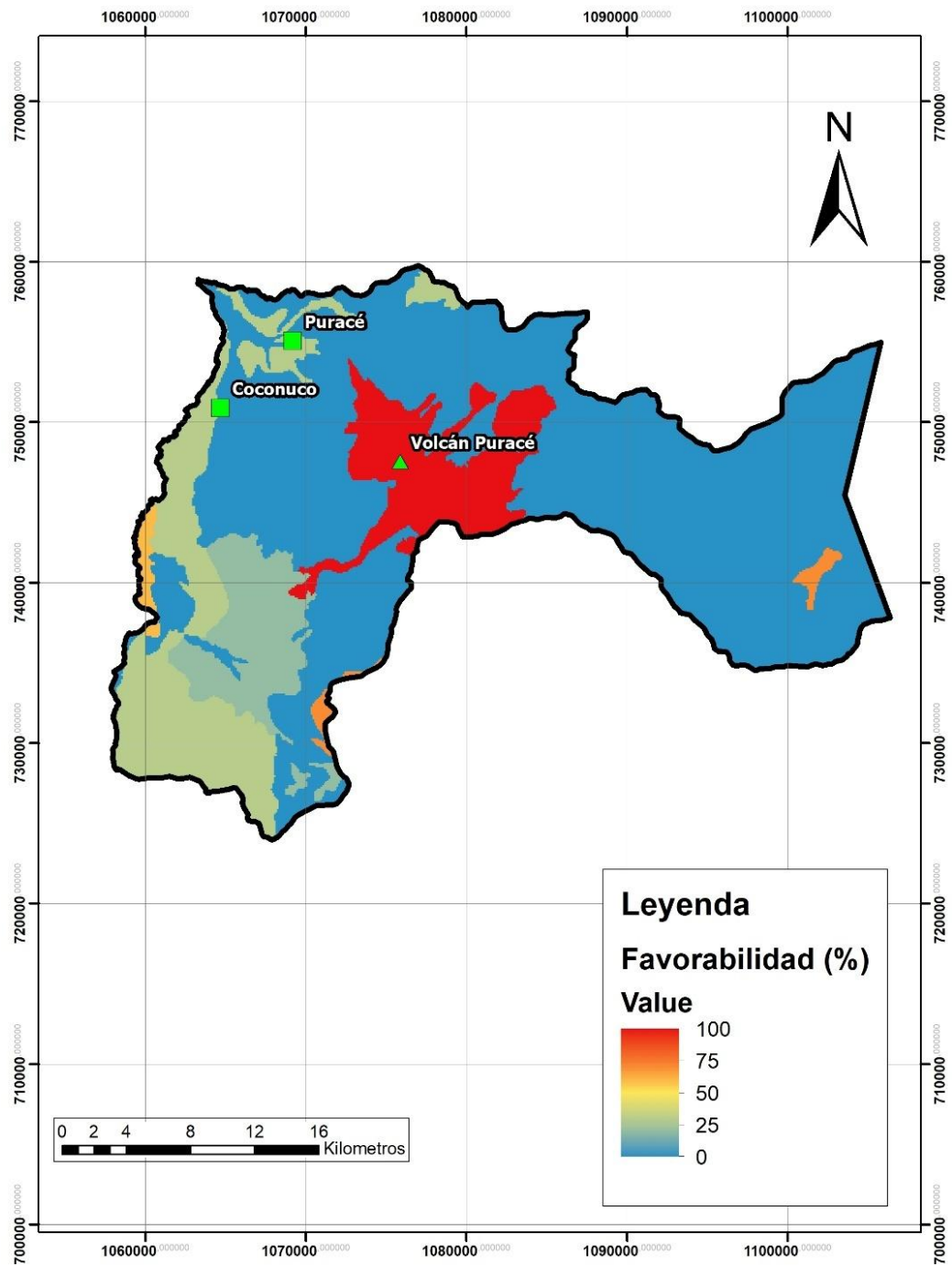


Figura 21. Mapa de favorabilidad volcánica generado a partir de las unidades volcánicas cuaternarias del municipio de Puracé.

La Figura 21 muestra los resultados de favorabilidad con base en las unidades volcánicas recientes (edad cuaternaria), lo cual representa una cercanía de los depósitos producto del volcanismo activo o volcanismo reciente. La zona de mayor favorabilidad según este criterio corresponde al área de influencia del volcán Puracé y la Cadena Volcánica Los Coconucos, que son el foco activo del volcanismo en esta parte de la región.

5.2.5. Mapa de favorabilidad geotérmica y zonas de interés en el municipio de Puracé

El mapa de favorabilidad geotérmica para el municipio de Puracé (Figura 22) fue obtenido a partir de la integración ponderada de los modelos de favorabilidad obtenidos para cada parámetro (Geoquímica (40%), estructural (30%), geología (20%) y volcanismo reciente (10%)).

El resultado de la integración de la información muestra una amplia zona con alta favorabilidad hacia el límite occidental del municipio, la cual está constituida principalmente por el trazo de la falla de San Jerónimo y donde se encuentran unidades geológicas que presentan condiciones favorables para la circulación de fluidos en profundidad. Hacia el sector noroccidental se encuentra, con una alta favorabilidad, la presencia de los manantiales termales del grupo B que, según Alfaro (2013), corresponden a fluidos de origen magmático con temperaturas de reservorio estimadas entre 212 °C y 229 °C, es decir que podría tratarse de un sistema geotérmico de alta entalpía. La favorabilidad geotérmica disminuye progresivamente hacia el oriente, en el cual se encuentra una segunda zona con favorabilidad intermedia, que coincide con la ubicación de la Cadena Volcánica Los Coconucos, y además se encuentra la intersección entre las fallas Coconucos, Moras Este y Moras Oeste. La zona propuesta para realizar estudios a profundidad en una siguiente etapa de exploración se encuentra señalada en el rectángulo verde, la cual tiene un área aproximada de 500 km².

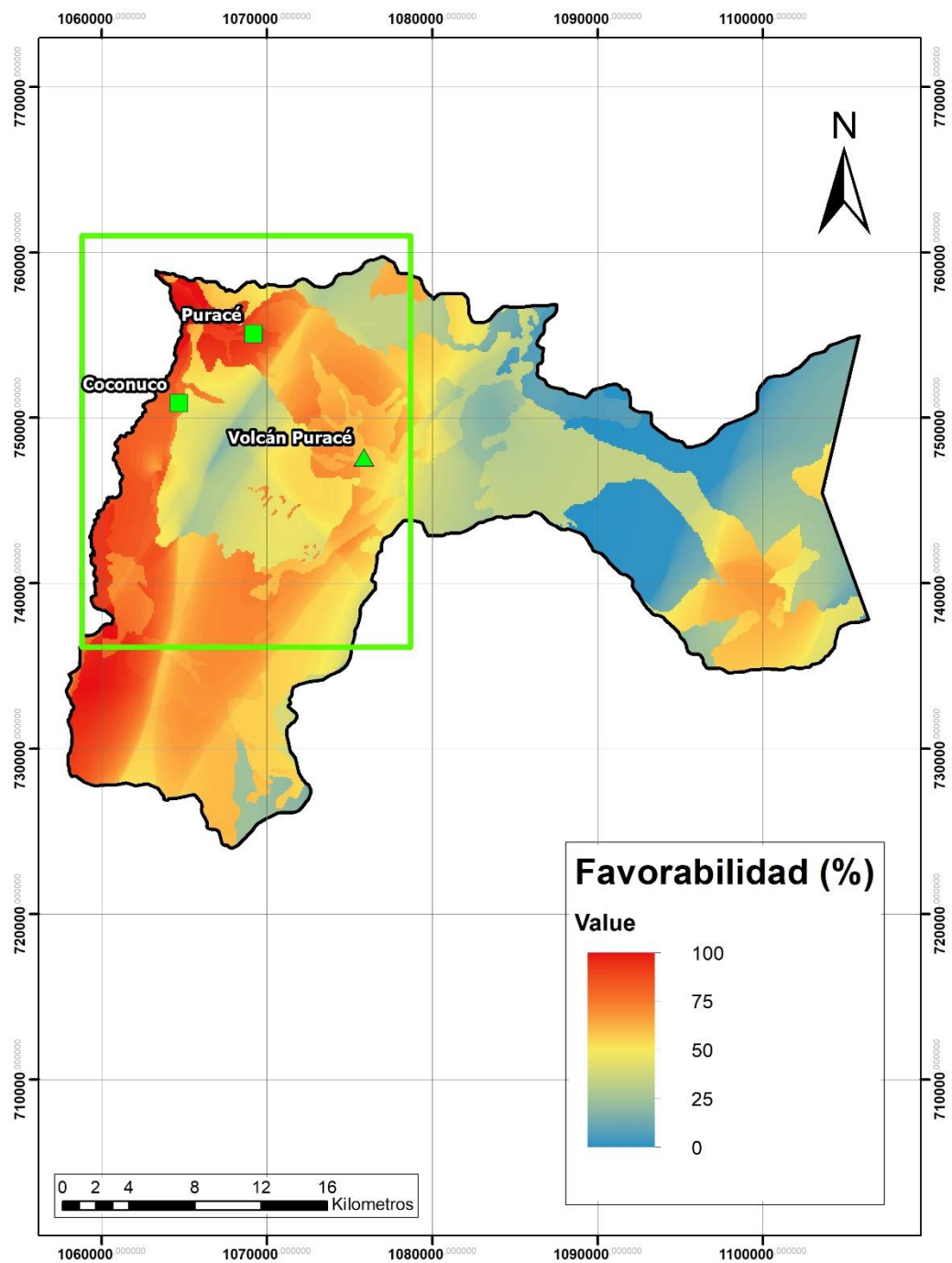


Figura 22. Mapa de favorabilidad geotérmica generado a partir de la ponderación de los mapas de favorabilidad anteriores del municipio de Puracé.

5.3. Análisis de los recursos geotérmicos en el municipio de Sotará

5.3.1. Geoquímica de manifestaciones termales en el municipio de Sotará

La información recopilada sobre los estudios geoquímicos realizados a los manantiales termales en el municipio de Sotará, se definió la favorabilidad geoquímica a partir de la temperatura profunda obtenida para el manantial termal Las Amarillas.

La Figura 23 muestra el resultado de la interpolación de las temperaturas profundas estimadas para los manantiales termales presentes en el municipio de Sotará. El resultado de la interpolación de temperaturas profundas muestra una distribución uniforme en toda el área, debido a que no se cuenta con suficientes datos de temperaturas profundas con las cuales establecer un modelo más confiable.

A pesar de que el modelo de favorabilidad geoquímica no muestra una distribución de las temperaturas confiable debido a la falta de información en la región, el modelo de favorabilidad resultante sirve mucho de base para identificar las zonas que reúnen condiciones favorables de permeabilidad para la circulación de fluidos en profundidad. Sin embargo, es fundamental la adquisición de información en campo de nuevos puntos de nacimientos termales que permita realizar una caracterización geoquímica, con la cual se puede estimar las temperaturas a profundidad por medio de geotermómetros, y de esta manera poder construir un modelo de distribución de temperaturas en profundidad más confiable para esta zona de estudio.

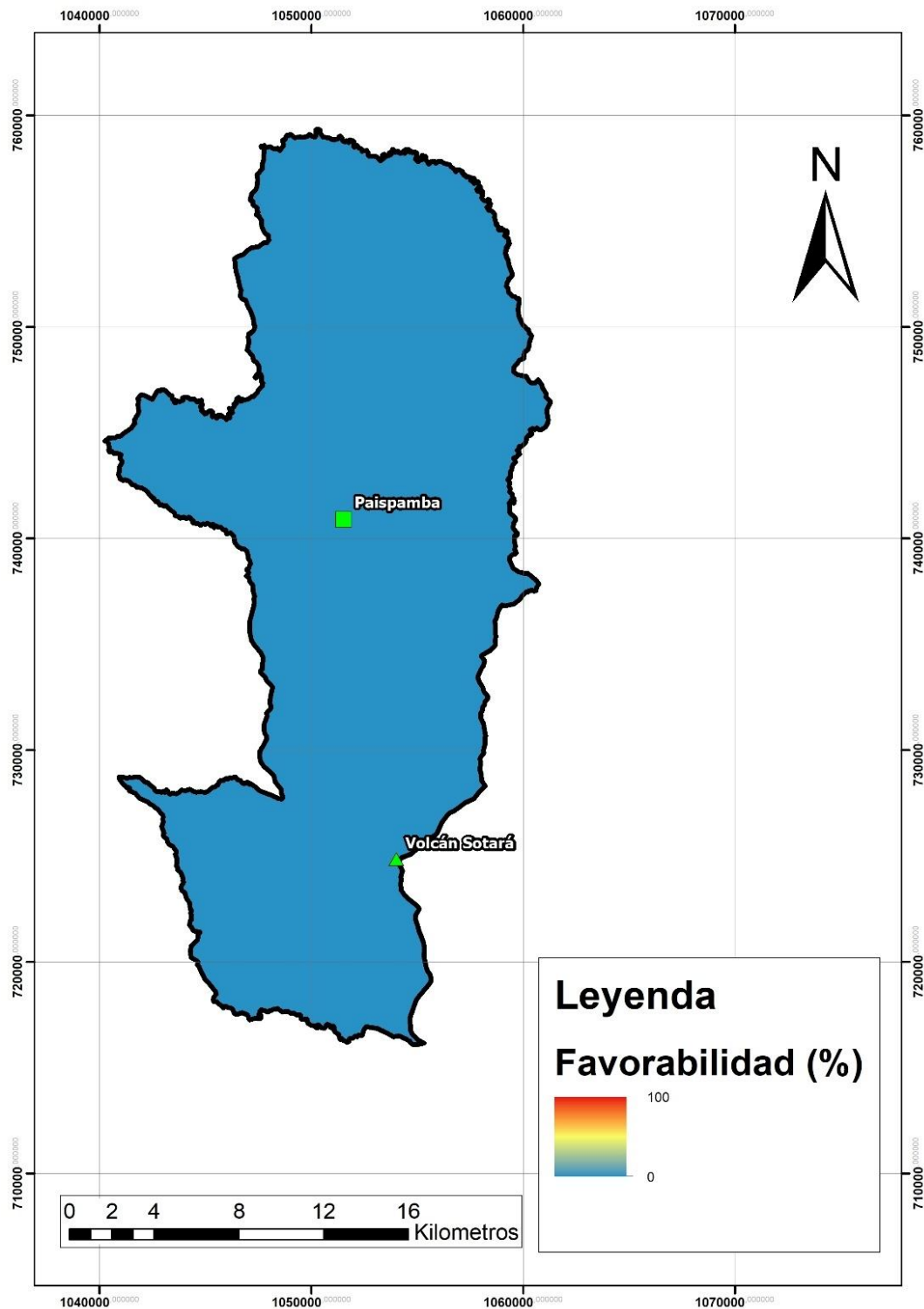


Figura 23. Mapa de favorabilidad geoquímica generado a partir de la interpolación de las temperaturas profundas para las fuentes termales del municipio de Sotará.

5.3.2. Geología en el municipio de Sotaró

A partir del criterio de favorabilidad para las unidades geológicas, se estableció la siguiente clasificación para las unidades geológicas presentes en el municipio de Sotaró.

Tabla 19. Clasificación de las unidades geológicas del municipio de Sotaró con base en los criterios de favorabilidad geológica.

Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé				
Código	Nombre/Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Rmeca	Roca de calidad mala de esquistos cuarzo micáceos y grafitosos del Complejo Arquía	Paleozóico	Rocas sedimentarias paleozóicas	40
Rmeva	Roca de calidad mala de esquistos verdes del Complejo Arquía	Paleozóico	Rocas sedimentarias paleozóicas	40
Rmlcq	Roca de calidad mala lavas del Complejo Quebradagrande	Mesozóico	Lavas antiguas	10
Rrca	Roca de calidad regular de obsidiana Cerro Azafatudo	Pleistoceno	Lavas recientes	20
Rrcpd	Roca de calidad regular Cierra Puertas - El Diviso	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Rrdc	Roca de calidad regular Unidad Eruptiva Domo Colada	Cuaternario	Lavas recientes	20
Rrde	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva Domo Externos	Holoceno	Lavas recientes	20
Rreca	Roca de calidad regular de esquistos cuarzo micáceos y grafitosos del Complejo Arquía	Paleozóico	Rocas sedimentarias paleozóicas	40
Rrgb	Roca de calidad regular granitoide de Bellones	Mesozóico	Unidad geológica intrusiva	0
Rriea	Roca de calidad regular ignimbrita soldada El Auca	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Rrifp	Rocas de calidad regular de ignimbritas de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Rrl	Roca de calidad regular lavas y flujos de lava	Cuaternario	Lavas recientes	20
Rrlc	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva La Corona	Holoceno	Lavas recientes	20

Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé				
Código	Nombre/Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Rrlcg	Roca de calidad regular lavas Cerro Gordo	Holoceno	Lavas recientes	20
Rrlcq	Roca de calidad regular lavas del Complejo Quebradagrande	Mesozóico	Lavas antiguas	10
Rrlds	Roca de calidad regular Unidad Eruptiva Lavas de los Domos Somitales	Holoceno	Lavas recientes	20
Rrpa	Roca de calidad regular de pórfido andesítico	s.f.	Unidad geológica intrusiva	0
Rrs	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva Sucubún	Pleistoceno	Lavas recientes	20
Rrsr	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva San Roque	Pleistoceno	Lavas recientes	20
Rrvcn	Roca de calidad regular lavas Cerro Negro	Pleistoceno	Lavas recientes	20
Srcp	Suelo residual de depósitos de caídas piroclásticas	Cuaternario	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Srdifp	Suelo residual de depósito de ignimbrita de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Srea	Suelo residual de depósito de ignimbrita soldada El Auca	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Sreca	Suelo residual de esquistos cuarzomicaceos del Complejo Arquía	Paleozóico	Rocas sedimentarias paleozoicas	40
Srfp	Suelo residual de depósitos volcanoclásticos de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Srgb	Suelo residual del Granitoide de Bellones	Mesozóico	Unidad geológica intrusiva	0
Srvi	Suelo residual de depósito volcanoclástico indiferenciado	Cuaternario	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Srvlc	Suelo residual de depósito volcanoclástico Las Cabras	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stad	Suelo transportado de depósito de acumulación denudativa	Cuaternario	Suelos transportados	0

Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé				
Código	Nombre/Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Staerb	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica Río Rioblanco	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Staern	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica y lahar Río Negro	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
StaeV	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica	Cuaternario	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stc	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva Chapa	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stcfa	Suelo transportado en cauce fluvial activo	s.f.	-	0
Stco	Suelo transportado de coluvión	s.f.	-	0
Stcp	Suelo transportado de depósitos de caídas piroclásticas	s.f.	-	0
Stcv	Suelo transportado volcanoclástico Casa Vieja	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stdf	Suelo transportado de depósitos fluviales mixtos	s.f.	-	0
Steb	Suelo transportado volcanoclástico Unidad eruptiva El Barrial	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stfg	Suelo transportado fluvio - glaciar	s.f.	-	0
Stfvlc	Suelo transportado por flujos volcanoclásticos Las Cabras	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stla	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva Los Alisales	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stlc	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva Las Cabras	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stlcu	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva La Cueva	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100

Unidades geológicas presentes en el municipio de Puracé				
Código	Nombre/Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Stlp	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva La Piedra	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stlpa	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva La Paila	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stlsy	Suelo transportado volcanoclástico Unidades Eruptivas Llano de Sotaró y Unidad Eruptiva Yerbabuena	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stlv	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva Las Vegas	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stq	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva Quilcacé	Holoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Sts1	Suelo transportado volcanoclástico Unidad Eruptiva Sucubún 1	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Stta	Suelo transportado de terraza aluvial	s.f.	-	0
Stvi	Suelo transportado de depósito volcanoclástico indiferenciado	Cenozoico	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100
Sty	Suelo transportado por flujos volcanoclásticos Yerbabuena	Pleistoceno	Rocas volcano sedimentarias cenozoicas	100

Fuente: Propia a partir de Cruz et al. (2021a).

La Figura 24 muestra los resultados de favorabilidad geológica del municipio de Sotaró. Se observan zonas con alta favorabilidad que corresponden a unidades volcano sedimentarias de edad cenozoicas, y la presencia de zonas de favorabilidad baja que representan unidades como lavas y depósitos volcano sedimentarios recientes (no consolidados) hacia la parte suroriental, donde se encuentra ubicado el volcán Sotaró. También destacan zonas de favorabilidad intermedia a baja correspondientes a unidades de roca sedimentaria de edad paleozoica.

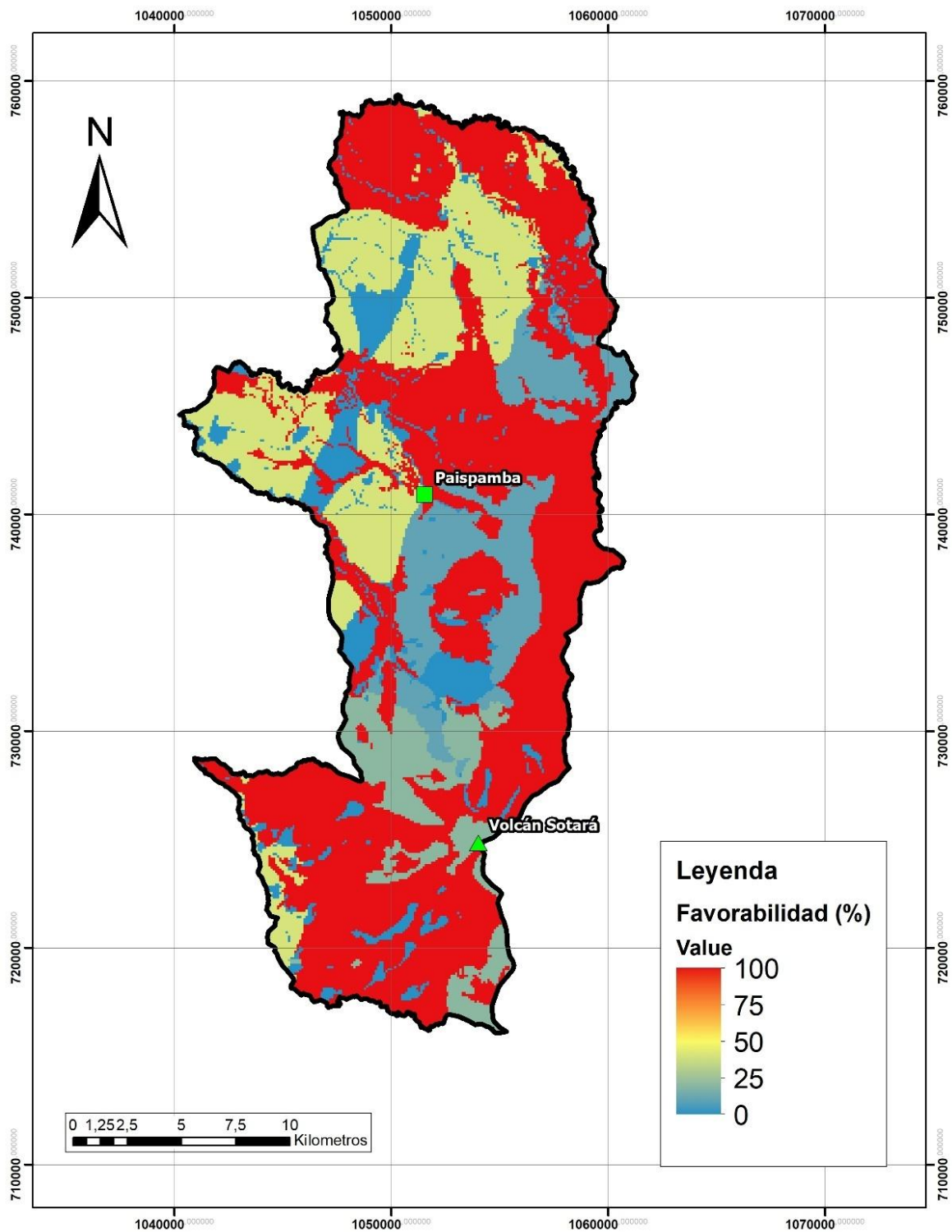


Figura 24. Mapa de favorabilidad geológica generado a partir de las unidades geológicas del municipio de Sotará.

5.3.3. Estructuras geológicas en el municipio de Sotará

Tabla 20. Clasificación de las estructuras geológicas del municipio de Sotará con base en los criterios de favorabilidad estructural.

Estructura	Extensión (km)	Régimen de esfuerzos	Orden	Frecuencia
Falla El Crucero	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla Guabas	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla Las Estrellas	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla Popayán	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla Quilcacé	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla San Jerónimo	>100 km	Compresivo	0C	5
Falla Silvia Pijao	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla Río Guachicono	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla 1	Entre 1 y 10 km	Compresivo	2C	1
Falla 2	Entre 1 y 10 km	Compresivo	2C	1
Falla 3	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla 4	Entre 1 y 10 km	Compresivo	2C	1
Falla 5	Entre 10 y 100 km	Compresivo	1C	2
Falla 6	Entre 1 y 10 km	Compresivo	2C	1
Falla 7	Entre 1 y 10 km	Compresivo	2C	1
Falla 8	Entre 1 y 10 km	Compresivo	2C	1
Falla 9	Entre 1 y 10 km	Compresivo	2C	1

Fuente: Propia a partir de Cruz et al. (2021a).

La Figura 25 muestra los resultados de favorabilidad estructural del municipio de Sotará. Se observan zonas de alta favorabilidad principalmente hacia la parte oriental del municipio, sobre el trazo de la falla de San Jerónimo, debido a que, como se mencionó anteriormente, es una falla de carácter regional que podría favorecer la circulación de fluidos a profundidades altas. Además, se tienen zonas de favorabilidad intermedia hacia el centro y el noroccidente del municipio, en donde se haya un agrupamiento de pequeñas fallas transversales a las fallas principales que van en sentido SW-NE como la falla Silvia-Pijao, falla Popayán, falla el Crucero y la falla Las Estrellas.

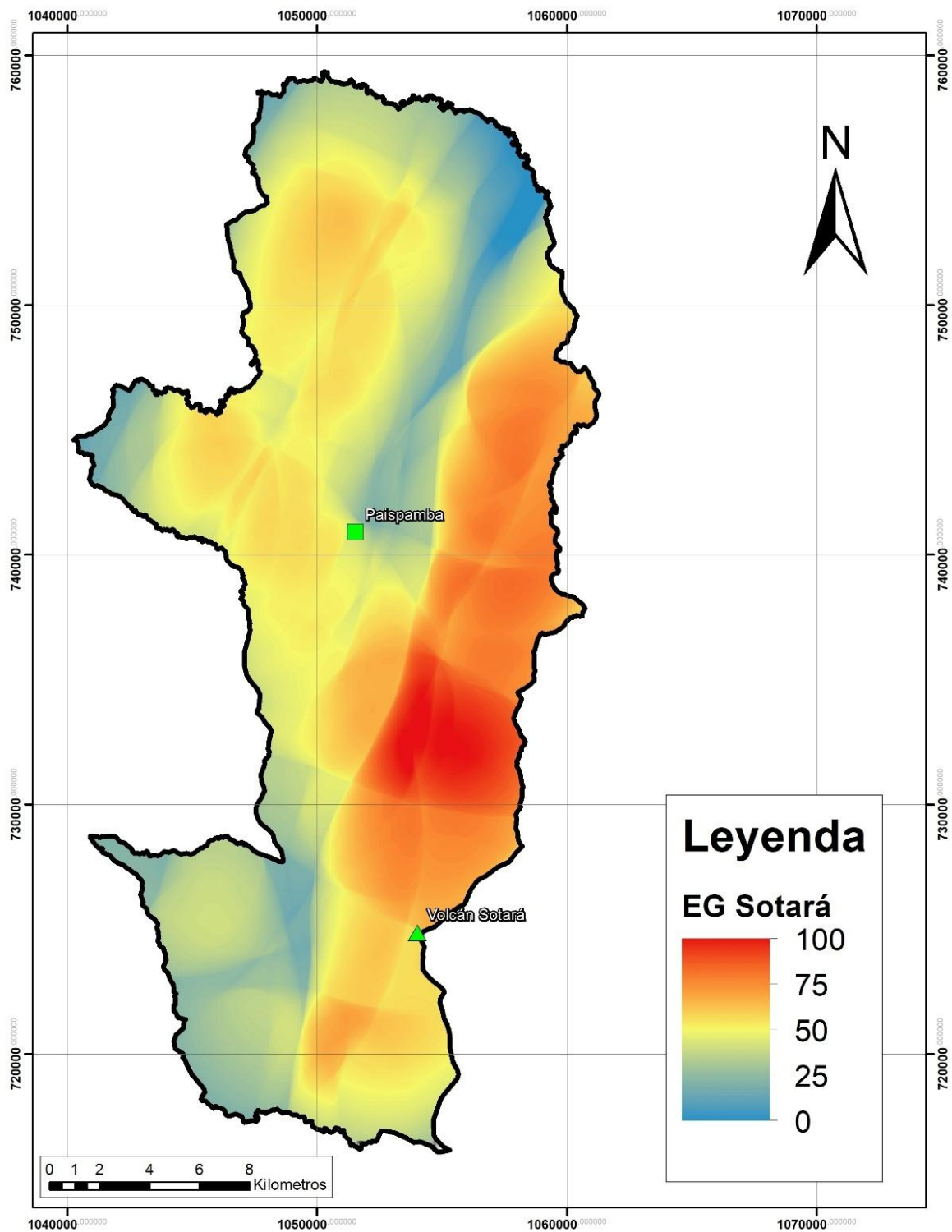


Figura 25. Mapa de favorabilidad estructural generado a partir de las estructuras geológicas del municipio de Sotará.

5.3.4. Volcanismo cuaternario en el municipio de Sotar

A partir del criterio de favorabilidad volcanológica, se estableció la siguiente clasificación para las unidades volcánicas recientes presentes en el municipio de Sotar.

Tabla 21. *Clasificación de las unidades volcánicas recientes del municipio de Sotar con base en los criterios de favorabilidad de volcanismo cuaternario.*

Unidades volcánicas recientes en el municipio de Sotar				
Código	Nombre/Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Rrca	Roca de calidad regular de obsidiana Cerro Azafatudo	Pleistoceno	Q(P)va	40
Rrcpd	Roca de calidad regular Cierra Puertas - El Diviso	Pleistoceno	Q(P)v	30
Rrdc	Roca de calidad regular Unidad Eruptiva Domo Colada	Holoceno	Qvh	100
Rrde	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva Domos Externos	Holoceno	Qvh	100
Rriea	Roca de calidad regular ignimbrita soldada El Auca	Pleistoceno	Q(P)v	30
Rrifp	Rocas de calidad regular de ignimbritas de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario	Q(P)vc	20
Rrlc	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva La Corona	Holoceno	Qvh	100
Rrlcg	Roca de calidad regular lavas Cerro Gordo	Holoceno	Qvh	100
Rrls	Roca de calidad regular Unidad Eruptiva Lavas de los Domos Somitales	Holoceno	Qvh	100
Rrs	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva Sucubún	Pleistoceno	Q(P)v	30
Rrsr	Roca de calidad regular lavas Unidad Eruptiva San Roque	Pleistoceno	Q(p)v	30
Rrvcn	Roca de calidad regular lavas Cerro Negro	Pleistoceno	Q(P)v	30
Srdifp	Suelo residual de depósito de ignimbrita de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario	Q(P)vc	20
Srea	Suelo residual de depósito de ignimbrita soldada El Auca	Pleistoceno	Q(P)v	30

Unidades volcánicas recientes en el municipio de Sotará				
Código	Nombre/Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Srfp	Suelo residual de depósitos volcaniclásticos de la Formación Popayán	Neógeno-Cuaternario	Q(P)vc	20
Srvlc	Suelo residual de depósito volcaniclástico Las Cabras	Holoceno	Qvc	90
Staerb	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica Río Rioblanco	Pleistoceno	Q(P)v	30
Staern	Suelo transportado por avalancha de escombros volcánica y lahar Río Negro	Holoceno	Qav-Qlv	55
Stc	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Chapa	Pleistoceno	Q(P)v	30
Stcv	Suelo transportado volcaniclástico Casa Vieja	Pleistoceno	Q(P)v	30
Steb	Suelo transportado volcaniclástico Unidad eruptiva El Barrial	Pleistoceno	Q(P)v	30
Stfvlc	Suelo transportado por flujos volcaniclásticos Las Cabras	Holoceno	Qvc	90
Stla	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Los Alisales	Pleistoceno	Q(P)v	30
Stlc	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Las Cabras	Holoceno	Qvc	90
Stlcu	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Cueva	Holoceno	Qvc	90
Stlp	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Piedra	Holoceno	Qvc	90
Stlpa	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva La Paila	Holoceno	Qvc	90
Stlsy	Suelo transportado volcaniclástico Unidades Eruptivas Llano de Sotará y Unidad Eruptiva Yerbabuena	Pleistoceno	Q(P)v	30

Unidades volcánicas recientes en el municipio de Sotará				
Código	Nombre/Litología	Edad	Grupo de favorabilidad	% Fav
Stlv	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Las Vegas	Holoceno	Qvc	90
Stq	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Quilcacé	Holoceno	Qvc	90
Sts1	Suelo transportado volcaniclástico Unidad Eruptiva Sucubún 1	Pleistoceno	Q(P)v	30
Stvi	Suelo transportado de depósito volcaniclástico indiferenciado	Cenozoico	Qv	70
Sty	Suelo transportado por flujos volcaniclásticos Yerbabuena	Pleistoceno	Q(P)v	30

Fuente: Propia a partir de Cruz et al. (2021a).

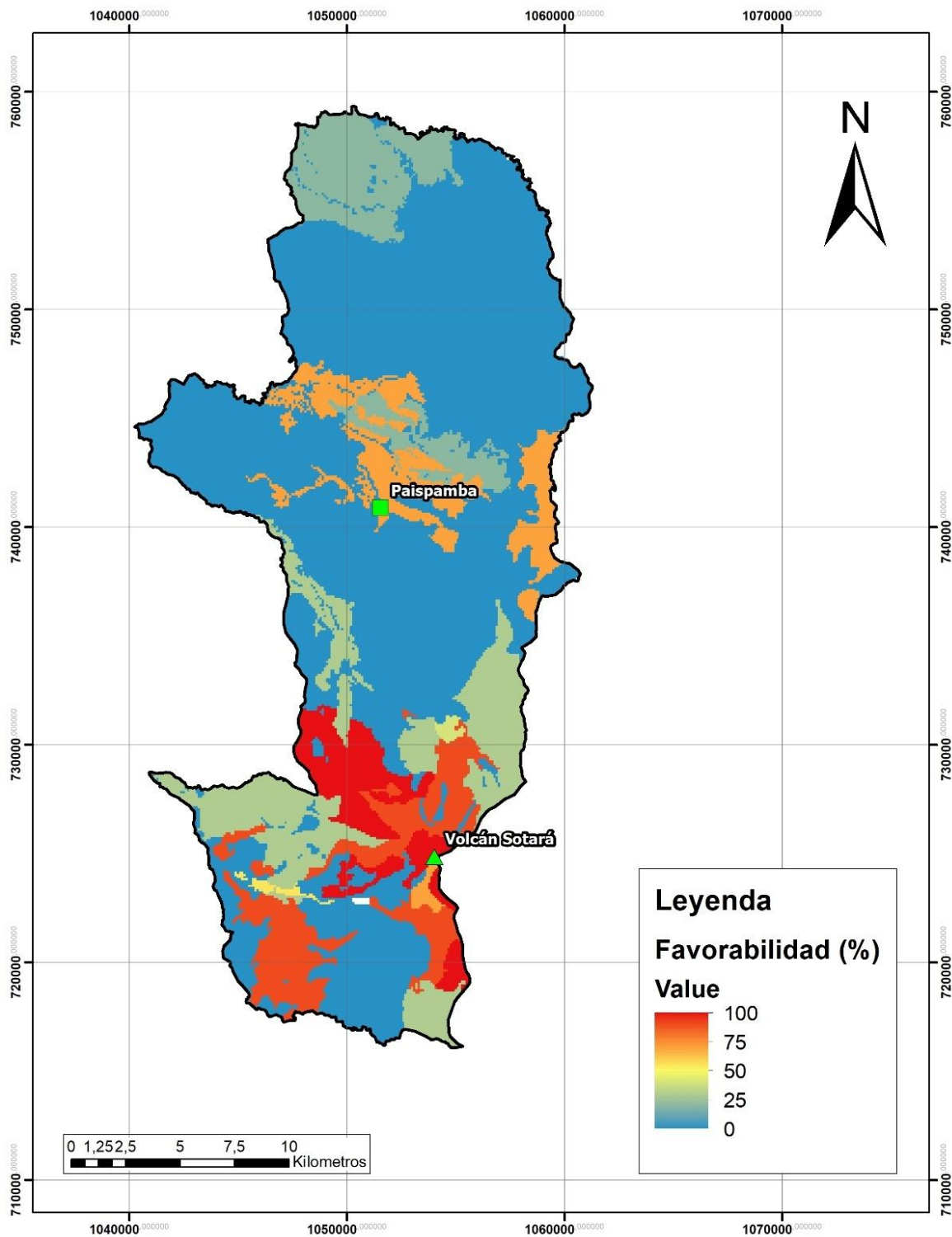


Figura 26. Mapa de favorabilidad volcánica (derecha) generado a partir de las unidades volcánicas cuaternarias del municipio de Sotará (izquierda).

La Figura 26 muestra los resultados de favorabilidad con base en las unidades volcánicas recientes (edad cuaternaria) en el municipio de Sotará, lo cual representa una cercanía de los depósitos a los focos de volcanismo activo o volcanismo reciente. La zona de mayor favorabilidad según este criterio corresponde al área de influencia del volcán Sotará.

5.3.5. Mapa de favorabilidad geotérmica y zonas de interés en el municipio de Sotará

El mapa de favorabilidad geotérmica para el municipio de Puracé fue obtenido a partir de la integración ponderada de los modelos de favorabilidad obtenidos para cada parámetro (Geoquímica (40%), estructural (30%), geología (20%) y volcanismo reciente (10%)).

La Figura 27 muestra el resultado de la integración de la información, donde se observa una amplia zona con alta favorabilidad hacia el límite oriental del municipio que, al igual que en el municipio de Puracé, constituye el trazo de la falla de San Jerónimo, y además presenta unidades geológicas con condiciones favorables para la circulación de fluidos en profundidad. Hacia el occidente del municipio, existen tres zonas hacia el sur, centro y centro-norte con favorabilidad intermedia a alta, que corresponde a zonas de alta densidad de fallas con unidades geológicas que presentan condiciones favorables para la circulación de fluidos a profundidad. La zona propuesta para realizar estudios a detalle se encuentra marcada en un polígono de contorno verde, la cual presenta un área de aproximadamente 430 km².

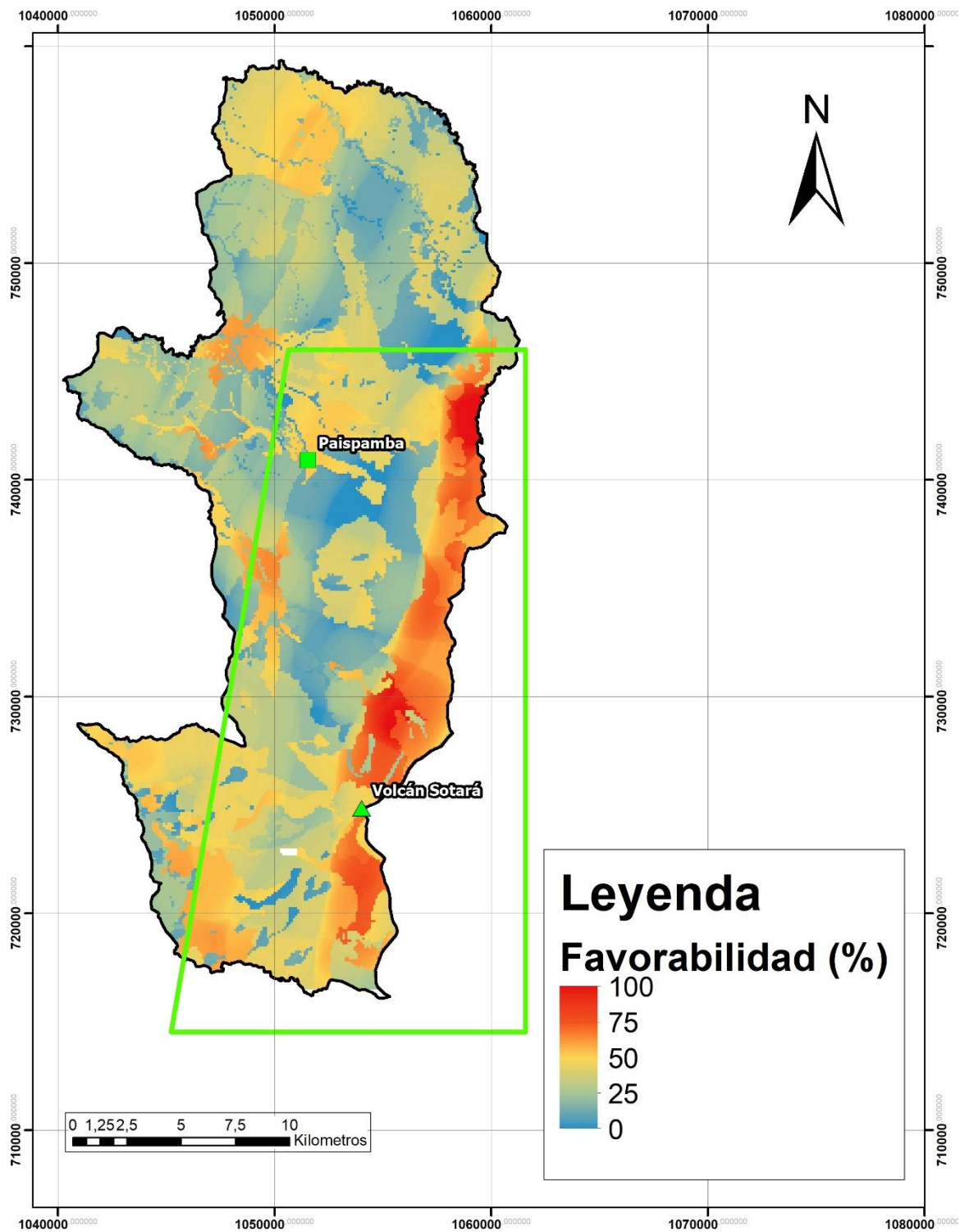


Figura 27. Mapa de favorabilidad geotérmica (derecha) generado a partir de la ponderación de los mapas de favorabilidad anteriores del municipio de Sotará (izquierda).

6. Análisis de resultados y discusión

Los municipios de Puracé y Sotará son regiones que presentan rasgos de volcanismo activo o reciente, lo cual permite establecer que los sistemas geotérmicos en estas dos regiones están asociados a esta actividad volcánica, donde los cuerpos magmáticos profundos o someros que alimentan el volcanismo de la región corresponden a la fuente de calor de los sistemas.

Según Alfaro (2013), las manifestaciones termales asociadas al volcanismo en el municipio de Puracé están caracterizadas por ser de origen magmático para los manantiales del grupo B, y de origen vapor-calentados para los manantiales de los grupos A y C. Para el municipio de Sotará, se tiene que el manantial Las Amarillas está asociado a un origen vapor-calentado.

Las temperaturas profundas obtenidas por los diferentes geotermómetros permiten establecer, según Alfaro (2013), un sistema de alta temperatura para los manantiales termales del municipio de Puracé, con un rango estimado de 212 °C a 229 °C, mientras que para el municipio de Sotará se estimó una temperatura de 177 °C, lo que correspondería a un sistema de media-alta entalpía.

Para efectos de la estimación de la favorabilidad geoquímica en el municipio de Puracé, se tomó el promedio de las temperaturas profundas calculadas con los distintos geotermómetros aplicados para cada punto de manifestación termal. Esto debido a que los manantiales del grupo B y C presentan un pH bajo, lo cual puede alterar las concentraciones de algunos de los iones presentes en las fuentes termales, y por ende aumentar la incertidumbre en los resultados. A pesar de ello, se considera que la existencia de la fuente termal es por sí sola un indicativo de favorabilidad que debe ser considerado para el análisis.

Para evaluación del parámetro de geoquímica de manantiales termales en el municipio de Sotará es necesario realizar un reconocimiento de campo, enfocado en la identificación y caracterización geoquímica de nuevos puntos de nacimientos termales, con el fin de poder obtener más información

en cuanto a la estimación de las temperaturas en profundidad por medio de geotermómetros, y de esta forma poder generar un modelo de distribución de temperaturas en profundidad más confiable.

Las estructuras geológicas presentes tanto en el municipio de Puracé como en el municipio de Sotaré están controladas principalmente por fallas asociadas al sistemas de fallas de Romeral, con una orientación SW-NE y son estructuras que presentan en general un grado de favorabilidad intermedio, a excepción de la falla de San Jerónimo, que es la estructura de mayor extensión de las que se encuentra en el área de estudio, y que presenta una alta favorabilidad en cuanto permeabilidad de carácter secundario.

La integración de la información permite observar que existen zonas con alto nivel de favorabilidad (>75%) tanto para el municipio de Puracé hacia el centro-occidente, como para el municipio de Sotaré hacia la franja oriental. Esta información es muy importante para poder avanzar en el conocimiento de los recursos en las regiones de estudio y sirve de base para definir las áreas en las que se podrían enfocar estudios más detallados en una siguiente fase de exploración.

De acuerdo con lo anterior, se recomienda, en primer lugar, complementar la información existente mediante estudios de campo que permitan desarrollar modelos de favorabilidad con un mayor grado de confiabilidad. Estos estudios deben enfocarse en la identificación de estructuras geológicas favorables para la circulación de fluidos a profundidad, trabajando a una escala más detallada, y en la identificación, caracterización fisicoquímica y geoquímica de nuevas fuentes termales, especialmente en el municipio de Sotaré, con el objetivo de obtener un modelo de distribución de temperaturas profundas en la región.

En relación con las zonas de interés para estudios a detalle, para el municipio de Puracé se propone un área que tiene aproximadamente 500 km², mientras que para el municipio de Sotaré se propone un área de aproximadamente 430 km². Se sugiere elaborar un plan de investigación que permita construir un modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico. Este plan debe

contemplar una actualización de la información sobre geología, estructuras geológicas y geoquímica de los manantiales termales, y la incorporación de información geofísica, hidrológica e hidrogeológica, geocronológica y el reconocimiento de alteraciones hidrotermales.

7. Conclusiones

La integración de datos volcánicos, geoquímicos, estructurales y geológicos ha permitido identificar zonas con alto nivel de favorabilidad geotérmica tanto en Puracé como en Sotará.

Los sistemas geotérmicos en estas regiones están estrechamente relacionados con la actividad volcánica reciente, donde las manifestaciones termales fueron caracterizadas de origen magmático o vapor-calentado para el municipio de Puracé, y de origen vapor-calentado para el municipio de Sotará, y temperaturas profundas que permiten clasificar los sistemas como de media a alta entalpía.

La presencia de manifestaciones termales, aun con limitaciones analíticas debido a factores como el pH, se considera un indicador clave de potencial geotérmico.

Los resultados obtenidos constituyen una base sólida para orientar futuras fases de exploración más detallada, que incluyan mapeo geológico más preciso, identificación de zonas de alteración hidrotermal y caracterización de nuevas fuentes termales.

Es fundamental complementar este estudio basado en información secundaria con trabajo de campo que permita reducir incertidumbres y aumentar la confiabilidad de los modelos generados.

Los mapas de favorabilidad geotérmica a partir de información secundaria se esperan sean comunicados a las comunidades interesadas de la zona mediante talleres y reuniones acordadas con las diferentes autoridades, para que las personas de la zona conozcan del potencial, las diferentes posibilidades que tienen en su territorio para el aprovechamiento de la energía geotérmica y su beneficio, para el desarrollo de la zona y la necesidad de estudios detallados.

Aunque el estudio parte de información secundaria importante y detallada particularmente, es fundamental complementar el estudio en una segunda fase con recorridos de campo en la zona: identificando y caracterizando más manantiales termales, zonas de alteración hidrotermal y detallando las unidades y estructuras geológicas.

Se recomienda estructurar un plan de estudios enfocado en la generación de un modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico. Este plan debe incluir la actualización de datos geológicos y geoquímicos, así como la incorporación de estudios geofísicos, hidrológicos, hidrogeológicos, geocronológicos y el reconocimiento de alteraciones hidrotermales.

8. Referencias

- Aguilera, F., Honores, C., Lemus, M., Neira, H., Pérez, Y., & Rojas, J. (2014). *Evaluación de los recursos geotérmicos de la región de Los Lagos*.
- Alcaldía de Puracé. (n.d.). *Mi municipio*. Retrieved May 19, 2025, from <https://www.purace-cauca.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Alcaldía Municipal de Sotará. (n.d.). *Geografía*. Retrieved May 19, 2025, from <https://www.sotara-cauca.gov.co/mapas-del-municipio/geografia>
- Alfaro, C. M. (2013). *Geoquímica de manantiales termales del departamento del Cauca*.
- Aravena, D., & Lahsen, A. (2015). *A geothermal favorability map of Chile, Preliminary results*.
<https://www.researchgate.net/publication/280720371>
- Barbosa, G. (2003). *Memoria explicativa. Mapa geológico del departamento del Cauca*.
- Jorquera, C. (2021, July 1). *3 proyectos piloto de energía geotérmica desarrollados en Colombia*.
<https://www.piensageotermia.com/3-proyectos-piloto-de-energia-geotermica-desarrollados-en-colombia/#:~:text=Explic%C3%B3n%20que%20por%20su%20privilegiada%20posici%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica,energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica%20de%20alrededor%20de%201.170%20MW>.
- Coronado, Y. C., & Garciadiego, A. M. (2015). *Metodología para la elaboración de un modelo conceptual a partir de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos en la fase de reconocimiento y prefactibilidad de un proyecto geotérmico*.
- Cruz, L. G., Rodríguez, E. A., Casas, J. C., Medina, E., Quintero, J. A., Quiñonez, D. A., Palechor, D. F., Cepeda, H., Tocancipá, J. E., Aguirre, K. J., Alzate, Julieth Carolina, Orozco, M. C., Daza, J. A., Acosta, P. A., Fernández, J. M., Fernández, C., Hoyos, D. A., & Muñoz, C. D.

- (2021a). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa del municipio de Sotará (Cauca). Escala 1:25.000.*
- Cruz, L. G., Rodríguez, E. A., Casas, J. C., Medina, E., Quintero, J. A., Quiñonez, D. A., Palechor, D. F., Cepeda, H., Tocancipá, J. E., Aguirre, K. J., Alzate; Julieth Carolina, Orozco, M. C., Daza, J. A., Acosta, P. A., Fernández, J. M., Fernández, C., Hoyos, D. A., & Muñoz, C. D. (2021b). *Zonificación de amenaza por movimientos en masa del municipio de Sotará (Cauca). Escala 1:25.000.*
- Gómez-Díaz, E., & Marin-Cerón, M. I. (2018a). Preliminary geochemical study of thermal waters at the Puracé volcano system (South Western Colombia): An approximation for geothermal exploration. *Boletín de Geología*, 40(1), 43–61. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018003>
- Gómez-Díaz, E., & Marin-Cerón, M. I. (2018b). Preliminary geochemical study of thermal waters at the Puracé volcano system (South Western Colombia): An approximation for geothermal exploration. *Boletín de Geología*, 40(1), 43–61. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018003>
- IDAE, & IGME. (2008). *Manual de geotermia.*
- Khumara, S., Velandia, F., Valencia, J., Romero, O., Buitrago, J., Bayona, N., Ruíz, G., Navarro, S., Castro, J., Trejos, G., Cuellar, M., Sandoval, J., & Barrera, L. (2014a). *Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa. Escala 1:100.000 Plancha 364 - Timbío y Huila.*
- Khumara, S., Velandia, F., Valencia, J., Romero, O., Buitrago, J., Bayona, N., Ruíz, G., Navarro, S., Castro, J., Trejos, G., Cuellar, M., Sandoval, J., & Barrera, L. (2014b). *Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa. Escala 1:100.000 Plancha 364 - Timbío y Huila.*

- Lemus, M., Pérez, Y., Honores, C., & Aguilera, F. (2015). *Favorabilidad Geotérmica en ambientes de media a alta entalpía de la Región de Los Lagos*.
- Llopis, G., & Rodrigo, V. (n.d.). *Guía de la energía geotérmica*.
- López, S., Cañola, E., Toro, G., Pulgarín, B., & Hermelín, M. (2011). *Geología del Miembro Chagartón de la Formación Coconucos* (Vol. 33).
- Marquínez, G., Rodríguez, Y., & Fuquen, J. (2003). *Plancha 365 Coconuco. Escala 1:100.000*.
- Montclair State University. (n.d.). *Energía geotérmica*. Retrieved May 20, 2025, from https://www-montclair-edu.translate.google/clean-energy-sustainability-analytics/resources/clean-energy-information/geothermal-energy/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20geot%C3%A9rmica%20representa%20una,producir%20electricidad%20o%20proporcionar%20calor.
- National Geographic. (2023, December 14). *Qué son los combustibles fósiles*. <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2023/12/que-son-los-combustibles-fosiles#:~:text=Estos%20combustibles%20no%20renovables%2C%20que,el%20acero%20hasta%20los%20pl%C3%A1sticos>.
- Orrego, A., & Acevedo, A. P. (1996). *Geología de la Plancha 364 - Timbío*.
- Pabón, M. N., Arteaga, A. M., & Cruz, L. (2019). *Investigación del potencial geotérmico recreacional de una fuente termal en el Cauca - Resguardo indígena de Guachicono - Fase de pre factibilidad*.
- Pulgarín, B., Monsalve, M. L., Navarro, S., Murcia, H., & Téllez, L. (2009). *Geología y Estratigrafía del Complejo Volcánico Sotará, Colombia*.
- Pulgarín, B., Navarro, S., Monsalve, M. L., Murcia, H., Téllez, L., Correa, A. M., Martínez, L., & Martínez, L. (2010). *Geología e Historia Eruptiva del Complejo Volcánico Sotará, Colombia*.

Servicio Geológico Colombiano. (n.d.). *Colombia*.

Trenkamp, R., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T., & Mora, H. P. (2002). Wide plate margin deformation, southern Central America and northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 15, 157–171.
www.elsevier.com/locate/jsames