

**Evaluación de las propiedades térmicas de las rocas de la zona
noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz e impactos ambientales
asociados a proyectos geotérmicos**

María Isabel Vélez Marquez

Trabajo de grado

Asesores:

Idalia Jacqueline López Sánchez

Daniela Blessent

Jasmin Raymond

**Universidad de Medellín
Programa de Ingeniería Ambiental
Medellín
2015**

1. Tabla de contenido

1. Tabla de contenido	0
Lista de figuras	3
Lista de tablas.....	4
Resumen	5
Introducción	7
2. Generalidades	9
2.1 Planteamiento del problema	9
2.2 Pregunta de investigación.....	12
2.3 Hipótesis.....	12
2.4 Justificación	12
2.5 Objetivos	14
2.5.1 Objetivo general	14
2.5.2 Objetivos específicos.....	14
3. Marco teórico.....	15
3.1 Energía geotérmica	15
3.2 Propiedades térmicas de las rocas	16
3.3 Impactos ambientales asociados a las centrales geotérmicas	16
3.4 Volcán Nevado del Ruíz	23
3.5 Antecedentes.....	25
4. Metodología.....	27
4.1 Trabajo de campo.....	28
4.2 Preparación de las muestras	30
4.3 Determinación de la conductividad térmica.....	32
4.3.1 Factor de corrección	35
4.3.2 Tratamiento de datos.....	36
4.4 Estimación de la capacidad calorífica	37
4.5 Estimación de la capacidad calorífica y conductividad térmica para las formaciones litológicas	38

4.6	Perfil geológico inferido	38
4.7	Temperatura a profundidad	39
4.8	Evaluación de recursos	40
4.9	Identificación de impactos ambientales asociados a proyectos geotérmicos en zonas volcánicas.....	41
4.10	Marco normativo colombiano aplicable al aprovechamiento de recursos geotérmicos.....	41
5	Resultados y discusión	41
5.1	Caracterización mesoscópica	42
5.2	Conductividad térmica y capacidad calorífica	43
5.3	Perfil geológico inferido	48
5.4	Estimación de la temperatura a profundidad.....	50
5.5	Evaluación de recursos	51
5.6	Impactos Ambientales asociados a proyectos geotérmicos en zonas volcánicas 53	
5.7	Marco Normativo Colombiano aplicable al aprovechamiento de recursos geotérmicos.....	57
6	Conclusiones y recomendaciones	59
7	Bibliografía.....	62

Índice de figuras

Figura 1: Emisión relativa de gases de efecto invernadero de varios métodos de generación de energía. Modificado de Hunt, 2001	18
Figura 2: Ubicación puntos de muestreo en las planchas 206 y 225 (Mosquera et al., 1998a; Mosquera et al., 1998b).	29
Figura 3: Afloramiento superficial en corte de carretera	30
Figura 4: Perforación de 4 mm de diámetro para la medición de la conductividad térmica.	31
Figura 5: Corte de las muestras.	31
Figura 6: Molino de discos rotatorios RS-200	32
Figura 7: Analizador de propiedades térmicas KD2 Pro	33
Figura 8: a) sensor RK-1; b) sensor TR-1. Fuente: http://www.decagon.com/products/thermal/accessories/tr-1-sensor/	34
Figura 9: Cilindro plástico de conductividad térmica conocida	35
Figura 10: Perfil geológico. Modificado de Central Hidroeléctrica de Caldas et al. (1983)	39
Figura 11: Puntos ubicados cada 200 m a lo largo del perfil	40
Figura 12: a) muestra 16 A; b) muestra 14 A	45
Figura 13: Resultados análisis de conductividad térmica y capacidad calorífica. Puntos de muestreo ubicados en las planchas 206 y 225 de INGEOMINAS.	47
Figura 14: Perfil A.....	48
Figura 15: Perfil B.....	49
Figura 16: Temperatura a profundidad a lo largo del perfil B	50
Figura 17: Estimación potencial geotérmico del área con $T > 200^{\circ}\text{C}$	51
Figura 18: Potencial geotérmico áreas fuera del PNN Los Nevados.....	52
Figura 19: Comparación de las emisiones de azufre generadas por centrales geotérmicas y por combustibles fósiles (Barbier, 2002).	55

Índice de tablas

Tabla 1: Centrales hidroeléctricas del municipio de Caldas	13
Tabla 2: Posibles impactos ambientales causados por diferentes sistemas geotérmicos. (modificado de Hunt, 2001).....	19
Tabla 3: Caracterización mesoscópica de las muestras.....	42
Tabla 4: Resultados análisis de conductividad térmica y capacidad calorífica	43
Tabla 5: Conductividad térmica y capacidad calorífica por unidad litológica	46
Tabla 6: Algunos impactos ambientales causados por las tres centrales geotérmicas consideradas: Cerro Prieto (México), Mount Amiata (Italia) y Miravalles (Costa Rica).	53

Agradecimientos

Este trabajo de investigación se realizó gracias a la colaboración entre la Universidad de Medellín, el *INRS - ETE* (Instituto Nacional de la Investigación Científica, Centro Agua, Tierra y Medio Ambiente) y al Programa Líderes Emergentes en las Américas del gobierno de Canadá

En primer lugar quiero agradecer a mis tutores Daniela Blessent, Idalia Jacqueline López y Jasmin Raymond por su orientación y apoyo en la realización de este proyecto, que más que mi trabajo de grado se convirtió en una gran experiencia. Al profesor Eduardo Parra por sus correcciones y aportes de gran importancia para culminar este trabajo.

Un agradecimiento especial a mis padres que siempre han estado a mi lado para apoyarme y que han sido parte fundamental de mi formación, y a mis amigos y compañero de la universidad con quien he compartido momentos inolvidables en los últimos años.

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo realizar una evaluación preliminar del potencial geotérmico de la zona norte y noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz (VNR), mediante la medición de la conductividad térmica y la capacidad calorífica de muestras de roca, e identificar los principales impactos ambientales asociados al aprovechamiento de los recursos geotérmicos en zonas volcánicas. El VNR es un estratovolcán activo, ubicado en el Parque Nacional Natural Los Nevadas, en los límites entre los departamentos de Caldas y Tolima. La explotación de los recursos geotérmicos en esta área podría suplir las necesidades energéticas locales, particularmente para la agricultura basada principalmente en el cultivo de café.

La conductividad térmica y la capacidad calorífica fueron determinadas en 62 muestras de roca colectadas en la zona norte y noroccidental del VNR durante una salida de campo realizada en noviembre del 2014; la conductividad térmica fue medida utilizando una sonda de aguja, y la capacidad calorífica fue estimada de acuerdo con el tipo de roca. Estos datos, junto con el flujo de calor, se utilizaron para estimar la temperatura a profundidad y posteriormente calcular el potencial geotérmico a lo largo de un perfil geológico inferido trazado en el área del estudio. Los impactos ambientales fueron identificados a partir de una revisión bibliográfica que permitió seleccionar tres centrales geotérmicas en operación ubicadas en zonas volcánicas, similar a la futura central geotérmica planeada en el área del VNR, para las cuales algunos impactos habían sido caracterizados.

Introducción

Colombia es un país atractivo para la producción de energía geotérmica debido a la existencia de actividad volcánica reciente en la cordillera central y occidental, generada por la subducción de la placa tectónica Nazca bajo la placa Suramérica. La investigación sobre los recursos geotérmicos del país se ha enfocado principalmente en tres áreas: el área geotérmica de Paipa, el sistema volcánico Chiles-Cerro Negro, y el volcán Nevado del Ruiz.

El nevado del Ruiz es un estratovolcán activo ubicado en el Parque Nacional Natural Los Nevados en el centro de la cordillera central, tiene una elevación de 5321 msnm y se encuentra cubierto por un casquete glaciar. La investigación geotérmica en esta región comenzó en 1968 con un estudio de reconocimiento geotérmico realizado por la compañía italiana ENEL (*Ente Nazionale per la Energia Elettrica*) y la Central Hidroeléctrica de Caldas. En 1983, un estudio de prefactibilidad, realizado por Central Hidroeléctrica de Caldas et al. (1983) localizó un área promisoría en el flanco sur occidental del Nevado del Ruiz, debido a la presencia de varios centros volcánicos activos y a la existencia de fumarolas con temperaturas superiores a 83°C. El primer pozo exploratorio en la zona fue perforado en 1997 en un área conocida como Las Nereidas, al occidente del volcán. Este pozo no alcanzó la profundidad planeada de 2000 m ya que sufrió una fuerte desviación, alcanzando únicamente 1466 m. Sin embargo esta perforación permitió identificar siete unidades litológicas con alteración hidrotermal y la temperatura medida en el fondo del pozo fue de 200°C (Monsalve et al., 1998).

Las investigaciones más recientes en esta área (2010-2012), se han realizado gracias a la colaboración entre ISAGEN, Colciencias, la Universidad Nacional de Colombia y el Servicio Geológico Colombiano y se han enfocado en las alteraciones hidrotermales (Forero, 2012), la evolución geoquímica y térmica del volcán (Rayo, 2012), las características cinemáticas de la falla Palestina (Mejía 2012), y en estudios geoeléctricos y magnetotelúricos (Almaguer, 2013; Rojas, 2012). Sin embargo no hay publicaciones sobre las propiedades térmicas de las rocas, que constituyen características esenciales para estimar el potencial geotérmico del área de estudio.

Los objetivos principales de este trabajo de investigación son 1) realizar una evaluación preliminar del potencial geotérmico del Volcán Nevado del Ruiz, a partir de la determina-

ción de la conductividad térmica y la capacidad calorífica en 62 muestras de roca colectadas en afloramientos superficiales de la zona norte y noroccidental del volcán, y 2) identificar los principales impactos ambientales asociados a la explotación de los recursos geotérmicos en otras zonas volcánicas con centrales geotérmicas en explotación.

La conductividad térmica fue medida utilizando una sonda de aguja, y la capacidad calorífica fue estimada de acuerdo con el tipo de roca. Estas dos propiedades térmicas, junto con el flujo de calor de la zona, permiten estimar la temperatura a profundidad y realizar una evaluación preliminar del potencial geotérmico.

2. Generalidades

2.1 Planteamiento del problema

De acuerdo a US Energy Information Administration (2014) en Colombia el 68% de la energía eléctrica proviene de las centrales hidroeléctricas, el 18% del gas, el 8% del carbón, el 1% del petróleo y el 5% de otras fuentes, es decir, que aun un alto porcentaje de la energía eléctrica generada proviene de los combustibles fósiles. Además aunque la energía hidroeléctrica es considerada una energía renovable, las grandes represas hidroeléctricas también han sido controversiales por su sustentabilidad ambiental y social (Siciliano et al., 2015).

La producción de energía mediante la quema de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y el petróleo, es altamente contaminante pues libera dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero que contribuyen al aumento del cambio climático. La generación de energía hidroeléctrica es una fuente de energía limpia, que emite menos gases de efecto invernadero y produce menos contaminación durante la fase de operación (Kumar et al., 2015); sin embargo la construcción de los embalses produce grandes cambios en el medio ambiente, relacionados con la fragmentación de los sistemas fluviales y la vegetación, impactos en la calidad del suelo, el agua, en la fauna acuática y cambios en la geomorfología (Siciliano et al., 2015). Frente a los impactos sociales, las represas han desplazado más de 80 millones de personas alrededor del mundo (Brown et al., 2009), han causado cambios en las formas de vida, e impactos en las relaciones sociales y culturales (Siciliano et al., 2015).

Como respuesta a los impactos ambientales causados por estas formas de generación de energía, a nivel mundial se han buscado fuentes de energía alternativas, que permitan suplir la demanda energética de una forma sostenible. Colombia también se ha interesado por este tema, y en el año 2010 el Consorcio Energético CORPOEMA (Corporación para la energía y el medio ambiente), presentó a la Unidad Nacional Minero Energética (UPME), la formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía: energía solar, energía eólica, pequeñas centrales hidroeléctricas, biomasa, geotermia y la energía nuclear. Los gases de efecto invernadero resultantes de la provisión de servicios energéticos han contribuido significativamente al incremento histórico de la concentración de estos gases en la atmosfera (IPPC, 2012). Desde los sistemas energéticos, existen múltiples opciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sin

dejar de satisfacer la demanda de servicios energéticos: La conservación y eficiencia energética, las energías renovables y la captura y almacenamiento de carbono. Las energías renovables además de tener un gran potencial para mitigar el cambio climático, pueden proveer otros beneficios como contribuir al desarrollo económico y social, facilitar un suministro de energía seguro y reducir los impactos negativos en el ambiente y en la salud (IPPC, 2012).

En este contexto, la geotermia emerge como una de las formas de energía menos contaminantes, con gran disponibilidad de recursos y que puede ser aprovechada en muchas partes del mundo que cuentan con dicho potencial (Espinoza et al., 2011; Glassley, 2014). De acuerdo con el plan presentado por CORPOEMA, Colombia es un país muy atractivo para la producción de energía eléctrica aprovechando del recurso geotérmico, debido a la presencia de actividad volcánica reciente en la Cordillera Occidental y Central, y a la presencia de actividad ígnea latente en algunas áreas de la Cordillera Oriental.

El macizo volcánico del Nevado de Ruiz es una de las áreas identificadas por su potencial geotérmico. Desde 1968 se han desarrollado diferentes investigaciones relacionadas con los recursos geotérmicos de esta zona. Los estudios más recientes, realizados gracias a la colaboración entre ISAGEN, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la Universidad Nacional de Colombia, el Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), la Universidad Autónoma de México y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), definen dos zonas de interés localizadas en el área de influencia del Macizo Volcánico del Ruiz (VNR), en particular en las partes Norte y Noroccidental, entre los límites departamentales de Risaralda, Caldas y Tolima.

Las investigaciones realizadas en estas áreas incluyen estudios sobre la evolución geoquímica y térmica del volcán (Rayo, 2012); las alteraciones hidrotermales (Forero, 2012); la susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica y térmica del sistema VNR (Rojas, 2012); las características cinemáticas y condiciones de deformación de un segmento de la falla Palestina (Mejía 2012) y un estudio magnetoteléurico del sector norte del volcán (Almaguer, 2013). Todos estos estudios son de gran importancia para la caracterización de los recursos geotérmicos de esta zona; sin embargo aún no se ha publicado ningún trabajo que evalúe las propiedades térmicas de los afloramientos rocosos de esta área.

La evaluación de las propiedades térmicas de las rocas de esta zona, serviría para inferir la conducción y absorción de calor, determinar el flujo de calor y estimar el gradiente geotérmico. De acuerdo a Andolfsson (2013) el conocimiento preciso de las propiedades térmicas es importante para lograr optimizar las operaciones de perforación, que constituyen

uno de los mayores costos asociados a la explotación de los sistemas geotérmicos. En el desarrollo de recursos geotérmicos de baja entalpía, las propiedades térmicas del suelo, especialmente la difusividad térmica, la conductividad térmica y la capacidad calorífica volumétrica, son particularmente importantes para la eficiencia y el costo efectivo de la recuperación del calor (van Manen et al., 2012).

El VNR se encuentra ubicado en jurisdicción de los municipios de Murillo, Villahermosa y Casablanca en el departamento del Tolima y en el municipio de Villamaría en el departamento de Caldas (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales). Villamaría es uno de los 47 municipios que hacen parte del Paisaje Cultural Cafetero (PCC), área declarada por la UNESCO como patrimonio inmaterial de la humanidad en el año 2011. El plan de manejo del Paisaje cultural Cafetero, incluye dentro de sus objetivos de gestión promover el desarrollo de la comunidad cafetera y su entorno, impulsar la integración y el desarrollo regional, y apoyar la sostenibilidad productiva y ambiental del Paisaje Cultural Cafetero (Ministerio de Cultura et al., 2009).

La implementación de un proyecto de generación de energía geotérmica en esta zona, que contribuya satisfacer las necesidades energéticas locales, constituye una estrategia para alcanzar estos objetivos, ya que impulsa el desarrollo regional y contribuye a satisfacer las necesidades energéticas de la región, teniendo siempre en cuenta proteger la sostenibilidad ambiental de este paisaje.

La generación de energía eléctrica a partir del calor geotérmico, requiere de grandes volúmenes de vapor, o de vapor y agua. Por lo tanto, el mayor impacto ambiental derivado de la generación de energía geotérmica, corresponde a la descarga de gases disueltos en los fluidos geotérmicos a la atmósfera, y a cuerpos de agua superficiales como ríos y lagos. Otros impactos minoritarios están relacionados con la generación de ruido, los sismos inducidos y la subsidencia (Clauser, 2006).

Para conservar los recursos naturales de la región de estudio es necesario realizar una identificación de los impactos ambientales que produciría un proyecto de generación de energía geotérmica en esta área, para posteriormente formular un plan de manejo ambiental que permita prevenir, mitigar y controlar estos impactos, teniendo en cuenta que es necesario conservar la sostenibilidad productiva y ambiental del Paisaje Cultural Cafetero.

2.2 Pregunta de investigación

¿La determinación de las propiedades térmicas de muestras de rocas de la zona Norte y Nor-occidental del Volcán Nevado del Ruiz permite estimar el potencial geotérmico de la zona?

2.3 Hipótesis

La medición de las propiedades térmicas de las rocas de la zona Norte y Nor-Occidental del Volcán Nevado del Ruíz permite establecer si el potencial geotérmico de la zona es adecuado para la generación de energía eléctrica.

2.4 Justificación

El consumo de energía a nivel mundial está creciendo rápidamente. Todas las sociedades requieren servicios de energía para satisfacer sus necesidades básicas y para su utilización en procesos productivos. Desde el año 1850, la utilización global de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) ha aumentado, llevando a un rápido crecimiento de las emisiones de dióxido de carbono (IPPC, 2012).

Una de las estrategias para disminuir estas emisiones y suplir las demandas energéticas, es la utilización de fuentes de energía renovables. La energía geotérmica es considerada una fuente de energía renovable, ya que el calor que emana del interior de la superficie terrestre es esencialmente ilimitado (Kagel et al., 2007), y no emite gases de efecto invernadero.

En Colombia existe un gran potencial para el aprovechamiento de este recurso, debido a la actividad volcánica que hay en la cordillera Central y Occidental, producto de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramérica.

El área de estudio de este proyecto está ubicada en el municipio de Villamaría, en el departamento de Caldas. El sistema de generación de energía en esta región está constituido por siete centrales hidroeléctricas operadas por la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) y una central (Miel 1) operada por Isagen. Estas 8 centrales tiene una capacidad total instalada de 402 Mw (tabla 1).

Tabla 1: Centrales hidroeléctricas del municipio de Caldas

Central hidroeléctrica	Capacidad instalada (Mw)
Sancancio	2,2
Municipal	18
Intermedia	0,9
Guacaica	0,9
Ínsula	19
La Esmeralda	30
San Francisco	135
Miel 1	196
Total	402

La CHEC presta servicio en los departamentos de Caldas y Risaralda. En Caldas atiende 27 municipios y 15 corregimientos, y en Risaralda, 13 municipios y 4 corregimientos (Central Hidroeléctrica de Caldas, 2013).

El aprovechamiento de los recursos geotérmicos en esta zona, permitiría diversificar las fuentes de generación de energía, utilizando una energía renovable, y disminuyendo la dependencia energética de la región de la energía hidroeléctrica, que generalmente se ve afectada por las variaciones climáticas, en particular en épocas de sequía, y en periodos donde se presenten eventos atmosféricos como el fenómeno del Niño, el cual intensifica los periodos secos y atenúa los periodos de lluvia.

Para lograr un aprovechamiento óptimo de los recursos geotérmicos es necesario ampliar los conocimientos que se tiene sobre estos sistemas. La determinación de las propiedades térmicas de las rocas permitiría determinar el flujo de calor, que, junto a la temperatura en profundidad, es una variable importante para evaluar el potencial geotérmico de un reservorio.

Además teniendo en cuenta que esta zona pertenece a un área declarada como patrimonio inmaterial de la humanidad, se hace necesario determinar claramente los impactos ambientales que la utilización de los recursos geotérmicos podría causar, como una manera de contribuir a conservar la sostenibilidad de la región.

Informaciones sobre las propiedades térmicas de las rocas del área de influencia del Volcán Nevado de Ruiz, que aún no aparecen en ninguna publicación científica, ampliarían los conocimientos sobre los recursos geotérmicos del país, y permitirían desarrollar las posibilidades de uso de los mismos, con plantas locales que podrían abastecer pequeñas regiones o ampliarse al Sistema Interconectado Nacional de Colombia.

2.5 Objetivos

2.5.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades térmicas de las rocas de la zona occidental del Volcán Nevado del Ruíz y los posibles impactos ambientales asociados a proyectos geotérmicos.

2.5.2 Objetivos específicos

- Medir la conductividad térmica y estimar la capacidad calorífica de las muestras de roca tomadas en afloramientos en la zona norte y noroccidental del Volcán Nevado del Ruíz.
- Elaborar el perfil geológico estimado de la zona de estudio.
- Revisar los impactos ambientales más comunes a centrales geotérmicas en operación.
- Describir el marco normativo colombiano que regula el aprovechamiento de los recursos geotérmicos.

3. Marco teórico

3.1 Energía geotérmica

La energía geotérmica se define generalmente como el calor almacenado en el subsuelo. Esto comprende tanto el calor almacenado en la roca sólida como en los fluidos que se encuentran en los poros (Clauser, 2006).

El origen de esta energía se relaciona con la estructura interna del planeta y con los procesos físicos que allí ocurren. El calor se mueve desde el interior del planeta, hacia la superficie, lo que se evidencia con el incremento de la temperatura de las rocas con la profundidad, probando que existe un gradiente geotérmico. En promedio este gradiente es de 30°C/ km de profundidad (Barbier, 2002).

Existen áreas de la corteza terrestre donde el gradiente geotérmico es muy superior al promedio. Esto ocurre cuando, cerca de la superficie (a algunos kilómetros) existen cuerpos magmáticos, todavía en un estado fluido o en proceso de solidificación, que liberan calor. En otras áreas donde la actividad magmática no existe, la acumulación de calor se debe a condiciones geológicas particulares de la corteza, por ejemplo un adelgazamiento de la corteza continental, que implica el afloramiento cercano de la frontera corteza-manto, y en consecuencia temperaturas más altas a profundidades menores (Barbier, 2002).

La energía geotérmica puede ser usada sin ninguna conversión (en forma de calor) en balneología (fuentes termales), procesos industriales, piscicultura y acondicionamiento (enfriamiento o calefacción) de edificios mediante bombas de calor geotérmicas; o puede ser transformada a través de turbinas de vapor para generar energía eléctrica (Clauser, 2006; Glassley, 2014; Hurter et al., 2003).

Además de una anomalía térmica, son necesarias ciertas características, para tener un recurso geotérmico productivo. Un sistema geotérmico es un conjunto de elementos naturales que se presentan en una misma área (campo geotérmico) y de la cual es posible extraer fluidos geotérmicos con diferentes fines (ISAGEN, 2012). Un campo geotérmico susceptible de aprovechamiento debe poseer al menos las siguientes características (CORPOEMA, 2010):

- **Fuente de calor:** puede ser una roca caliente que ha incrementado su temperatura por contacto con un cuerpo volcánico intrusivo; una cámara magmática o gases calientes de origen magmático. Generalmente la fuente de calor presenta temperaturas mayores a los 600 °C. Estas fuentes se pueden encontrar a diferentes profundidades, generalmente mayores a dos kilómetros (ISAGEN, 2012).
- **Reservorio geotérmico:** Es la parte explotable de un sistema de circulación, constituido por la secuencia de rocas saturadas de fluido caliente. Un reservorio geotérmico debe estar formado por rocas permeables, con un volumen suficientemente grande para asegurar la explotación prolongada de fluidos termales. Además debe estar localizado dentro de un sistema hidrológico que permita la recarga hidráulica del área en explotación (CORPOEMA, 2010).
- **Capa Sello:** estrato impermeable, generalmente compuesto por arcillas (esmectita o montmorillonita) producto de la alteración de las rocas por alta temperatura, que cubre el reservorio y evita la pérdida de agua y vapor (ISAGEN, 2012). Esta cobertura impermeable puede estar constituida por una roca o una secuencia de rocas con nula o poca permeabilidad (CORPOEMA, 2010).
- **Fluido Geotérmico:** se denomina así el agua, en su fase líquida o de vapor, o en combinación, que se encuentra en el reservorio geotérmico y que puede aflorar a la superficie de manera natural mediante manantiales de aguas termales o pozos geotérmicos. Estos fluidos a menudo contienen sustancias químicas disueltas como cloruros (Cl), dióxido de carbono sulfatos (SO₄) y sales minerales (ISAGEN, 2012).

3.2 Propiedades térmicas de las rocas

Las propiedades térmicas de las rocas, como la conductividad térmica y la capacidad calorífica son esenciales para comprender la transferencia de calor que se presenta en un sistema geotérmico. Los cambios de temperatura en un suelo ocurren en respuesta a la absorción o liberación de calor. La propiedad del suelo que describe la habilidad de un material para absorber o liberar calor es llamada capacidad calorífica volumétrica. La capacidad calorífica de un suelo depende del tipo de minerales presentes, de su porosidad,

y de la porción relativa de agua y aire en los vacíos. Es posible calcular la capacidad calorífica volumétrica de un sistema multifase, si se conoce el calor específico y la cantidad de cada constituyente (Fredlund et al., 2012).

La capacidad calorífica de cualquier sustancia es la cantidad de calor requerida para aumentar la temperatura de dicha sustancia en un grado (usualmente Celsius o Kelvin, que son equivalentes en este cálculo). A medida que la temperatura de una sustancia incrementa, este calor es almacenado en forma de mayor energía de translación, rotación y vibración. El calor es liberado cuando la sustancia se enfría. El calor específico de una sustancia es la capacidad calorífica por unidad de masa de la sustancia (Waples et al., 2004).

La conductividad térmica gobierna el flujo de calor a través de un material. La conducción es responsable del flujo de calor a través de materiales sólidos como las partículas de suelo (Fredlund et al., 2012). La conductividad térmica de las rocas es definida como la cantidad de calor conducida por segundo a través de un área de 1 m^2 (Barbier, 2002).

La conductividad térmica puede ser medida en laboratorio en muestras de roca, o in-situ en perforaciones. Existen numerosas técnicas para medir la conductividad térmica, siendo las más destacadas el método de barras divididas y la sonda de aguja (Clauser et al., 1995).

El procedimiento para determinar la conductividad térmica de rocas utilizando una sonda de agua térmica es una metodología estandarizado por la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (*American Society for Testing and Materials, ASTM*) en el *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure* (ASTM D5334-08). En este ensayo la conductividad térmica es determinada por una variación en el método de la línea fuente, usando una sonda de aguja que tiene una gran relación longitud diámetro para simular las condiciones de una fuente de calor de longitud infinita e infinitamente delgada.

El analizador de propiedades térmicas KD2 Pro, es una sonda que actúa como una fuente de calor y permite obtener medidas instantáneas de conductividad térmica. La sonda consiste en una aguja que contiene un calentador y un sensor de temperatura. Una corriente eléctrica es pasada a través del calentador y la temperatura de la sonda es monitoreada en el tiempo; un análisis de la temperatura de la sonda es usado para determinar la conductividad térmica (Decagon Devices Inc., 2008).

Este dispositivo fue usado en varios estudios, como en la investigación realizada por Akinyemi et al. (2012) en Nigeria, en la cual se utilizó la sonda KD2 Pro para validar la

determinación de propiedades térmicas de muestras de roca realizadas usando el método de bloques térmicos modificado. Este estudio obtuvo porcentajes de diferencia menores al 30% entre las mediciones realizadas con la sonda KD2 Pro y el método de bloques térmicos.

3.3 Impactos ambientales asociados a las centrales geotérmicas

La energía geotérmica es una fuente de energía limpia y sustentable, sin embargo su desarrollo tiene algunos impactos en el ambiente. Los aspectos positivos y negativos de estos impactos deben ser considerados antes de cualquier decisión en cuanto a aprovechar un campo geotérmico, así como las posibles medidas de mitigación (Kristmannsdóttir et al., 2003).

Este tipo de energía emite menores cantidades de gases de efecto invernadero que otras tecnologías. Sin embargo en cualquier comparación es importante tener en cuenta el ciclo completo de producción, es decir, todas las etapas antes, durante y después de la operación. Las centrales geotérmicas tienen particularmente bajas emisiones de CO₂ comparadas con otras fuentes de energía (figura 1), por lo tanto son una alternativa más atractiva para la generación de energía que el carbón, el petróleo o el gas (Rybach, 2003).

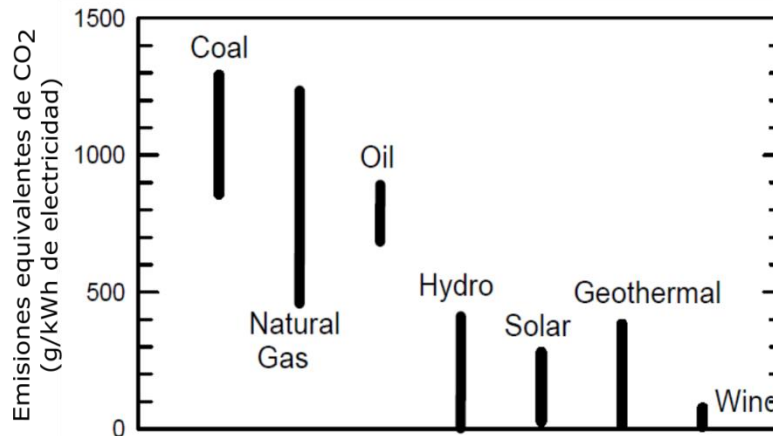


Figura 1: Emisión relativa de gases de efecto invernadero de varios métodos de generación de energía. Modificado de Hunt, 2001

Los efectos ambientales varían considerablemente de un campo geotérmico y una planta de producción a otra, dependiendo de las características del campo en cuestión. En particular, la geología y la estructura del subsuelo, así como el tipo de reservorio (de agua dominante o de vapor dominante), juegan un papel principal (Kristmannsdóttir et al., 2003). La tabla 2 muestra la magnitud de los posibles efectos ambientales causados por diferentes sistemas geotérmicos.

La mayoría de los potenciales impactos ambientales asociados con el desarrollo de una central geotérmica están relacionados con el uso y la contaminación de las aguas subterráneas, con la subsidencia del terreno, y los sismos inducidos como resultado de la reinyección de agua. Cuestiones como la contaminación del aire, el ruido, la seguridad y el uso del suelo también merecen consideración (Idaho National Laboratory, 2006).

De acuerdo a Barbier (2002) los principales impactos ambientales de una explotación geotérmica son la contaminación del aire y de los cuerpos hídricos superficiales. Según Clauser (2006) otros impactos menores están relacionados con la generación de ruido, los sismos inducidos y la subsidencia.

Tabla 2: Posibles impactos ambientales causados por diferentes sistemas geotérmicos.
Modificado de Hunt, 2001

	Sistemas de baja temperatura	Sistemas de alta temperatura	
		Vapor dominante	Líquido dominante
Operaciones de perforación:			
Destrucción de bosques y erosión	●	●●	●●
Ruido	●●	●●	●●
Luces brillantes	●	●	●
Contaminación de aguas subterráneas por los fluidos de perforación	●	●●	●●
Perdidas de masa:			
Degradación de características térmicas	●	●●	●●●
Subsidencia	●	●●	●●●
Disminución del agua subterránea	○	●	●●
Erupciones hidrotermales	○	●	●●
Cambios en la temperatura del subsuelo	○	●	●●
Disposición de fluidos residuales:			
Efectos en organismos vivos disposición en superficie	●	●	●●●
reinyección	○	○	○
Efectos en cuerpos de agua			

disposición en superficie	●	●	●●
reinyección	○	○	○
Contaminación de aguas subterráneas	●	●	●
Sismicidad inducida	○	●●	●●
Disposición de gas residual			
Efectos en organismos vivos	○	●	●●
Efectos en los microclimas	○	●	●

- Sin efecto
- Efecto pequeño
- Efecto moderado
- Efecto alto

- **Contaminación del aire:** El vapor de la mayor parte de campos geotermales contiene gases no condensables (CO₂, H₂S, NH₃, CH₄ y H₂) que varían en un rango de 1 a 5 g/Kg de vapor. El dióxido de carbono es el mayor componente, pero sus emisiones a la atmósfera siguen siendo menores que las producidas, por kWh generado, en las centrales eléctricas de gas, petróleo y carbón (Barbier, 2002). Investigaciones realizadas en zonas volcánicas sugieren que el desarrollo de campos geotérmicos, no hace ninguna diferencia en el CO₂ total emitido por estos terrenos (Kristmannsdóttir et al., 2003), ya que en las zonas volcánicas las emisiones naturales de CO₂ son elevadas.

El ácido sulfhídrico (H₂S), probablemente causa la mayor preocupación en el desarrollo de campos geotérmicos, ya que tiene un olor desagradable y es tóxico en concentraciones moderadas (Kristmannsdóttir et al., 2003). Los efectos en la salud causados por este compuesto varían de acuerdo al tiempo y a la concentración a la que se esté expuesto, sin embargo concentraciones superiores a 15 ppm (15mg/m³) se consideran tóxicas.

En centrales geotérmicas sus emisiones generalmente varían entre 0.5 y 6.8 g/kWh. El H₂S es oxidado a ácido sulfúrico, y puede causar lluvia ácida. Sin embargo no se ha establecido una relación directa entre las emisiones de H₂S y la lluvia ácida (Barbier, 2002).

Se ha observado que como resultado de las explotaciones de campos geotermales, la concentración de H₂S incrementa más que las concentraciones de CO₂, probablemente por la alta reactividad del H₂S (Kristmannsdóttir et al., 2003).

El vapor de los gases geotérmicos también puede contener amoníaco (NH₃), trazas de mercurio (Hg), vapores de boro (B), hidrocarburos como el metano (CH₄) y radón (Rn) (Barbier, 2002).

El boro, el amonio, y en menor medida el mercurio, es lixiviado de la atmosfera por la lluvia, causando contaminación en el suelo y en la vegetación. Estos contaminantes también pueden afectar los cuerpos de agua y afectar la vida acuática. Las emisiones de mercurio de las centrales geotérmicas varían en un rango entre 45 y 900 $\mu\text{g}/\text{kWh}$, y son comparables con las emisiones de mercurio de centrales eléctricas de carbón. El amonio es descargado a la atmosfera en concentraciones entre 57 y 1983 mg/kWh , pero debido a los procesos atmosféricos es disipado rápidamente (Barbier, 2002).

El radón es un isotopo radioactivo gaseoso presente en la corteza terrestre de forma natural, se encuentra contenido en el vapor geotérmico y es descargado a la atmosfera en concentraciones de 3700 a 78000 Becquerel/ kWh (Barbier, 2002).

- **Contaminación del agua:** Corrientes de líquido provenientes de la perforación de pozos pueden contener una variedad de minerales disueltos, especialmente en los depósitos de alta temperatura ($> 230^\circ \text{C}$). La cantidad de sólidos disueltos aumenta significativamente con la temperatura. Algunos de estos minerales disueltos (por ejemplo, boro y arsénico) podrían contaminar las aguas superficiales o subterráneas, así como dañar la vegetación local. Corrientes líquidas pueden entrar al ambiente a través de la escorrentía superficial o a través de roturas en el revestimiento del pozo. La reinyección a través de pozos perforados en sitios seleccionados del reservorio geotérmico es el método más común de disposición del agua. La reinyección también puede ayudar a mantener la presión del reservorio, para extraer calor adicional de las rocas y para prolongar la vida útil del recurso. La reinyección, puede ser a primera vista un poco costosa, ya que incluye pozos adicionales, tuberías superficiales y bombeo continuo, sin embargo a largo plazo los efectos son muy beneficiosos. Calculado sobre toda la vida útil total de un proyecto geotérmico la reinyección es normalmente menos costosa que la no reinyección (Barbier, 2002).
- **Subsidencia del terreno:** la subsidencia tiene lugar cuando la extracción de fluido excede la recarga natural. Existen evidencias de subsidencia en casi todas las áreas aprovechadas, aunque la magnitud de este fenómeno puede variar considerablemente (Kristmannsdóttir et al., 2003).

El peso de las rocas sobre un reservorio de agua subterránea, petróleo o fluidos geotérmicos es soportado en parte por las rocas del reservorio, y en parte por los fluidos que se encuentran en los poros de las rocas. Como los fluidos son removidos la presión de los poros se reduce y el suelo tiende a hundirse (Barbier, 2002). La subsidencia puede controlarse o prevenirse con la reinyección de los fluidos utilizados, sin embargo la reinyección puede inducir pequeños sismos (Barbier, 2002).

- **Ruido:** el ruido proveniente de los aprovechamientos geotérmicos consiste principalmente en el ruido de las perforaciones, el cual es un fenómeno temporal y casi nunca excede 90 dB. También se presenta ruido proveniente de la descarga de los pozos, que puede exceder 120 dB. Una vez que la planta entra en operación, un silenciador puede mantener el ruido ambiental por debajo de 65 dB (Kristmannsdóttir et al., 2003).
- **Sismos inducidos:** la reinyección de agua dentro del reservorio puede inducir mayor actividad sísmica, ya que reduce la resistencia de las rocas, amplía las fallas verticales y desencadena la actividad tectónica acumulada (Barbier, 2002). Un estudio, realizado por Batini et al. (1985) sobre la correlación entre la sismicidad y la reinyección de agua dentro de los pozos en el área geotérmica de Lardarello, sugiere que se induce un porcentaje de eventos sísmicos de baja magnitud. Sin embargo los datos también indican que un incremento en la cantidad de agua inyectada no aumenta el máximo valor de la magnitud de los eventos, solo su cantidad. Numerosos sismos son generados durante la explotación de campos geotérmicos pero en la mayoría de los casos estos eventos son menores a 2, en magnitud local e inferiores al umbral de percepción de las comunidades (Zang, et al., 2014). La reinyección de fluidos puede tener un efecto positivo, desencadenando un alto número de temblores de baja intensidad, pero favoreciendo la liberación progresiva de la tensión acumulada en las rocas (Barbier, 2002).
- **Perturbaciones en la fauna, la flora y el paisaje:** los problemas relacionados con la pérdida de hábitat o la perturbación de la vegetación son relativamente menores o inexistentes en proyectos hidrotermales, dado que el área utilizada para las operaciones geotérmicas, es relativamente limitada. Estos impactos potencia-

les se pueden minimizar con la planificación y la ingeniería adecuada (Idaho National Laboratory, 2006). Algunas prácticas de manejo que se pueden realizar son la utilización del principio de precaución, la realización de monitoreos ambientales, la planeación y diseño adecuada de la planta antes de comenzar la construcción para minimizar las descargas y realizar monitoreo continuos durante la fase de operación (Hunt, 2001).

3.4 Volcán Nevado del Ruíz

El volcán Nevado del Ruiz es un estratovolcán activo ubicado en la parte media de la cordillera central colombiana ($4^{\circ} 53'43''$ N, $75^{\circ} 19'21''$ W), en los límites de los departamentos de Caldas y Tolima. Tiene una elevación de 5321 msnm y se encuentra cubierto por un espeso casquete glaciar. Este volcán forma parte del complejo volcánico Ruiz-Tolima, eje volcánico con nueve volcanes alineados en la dirección Norte-Sur que definen la cresta de la Cordillera Central en este sector (Forero, 2012). El volcán posee una geometría cónica aplanada en la parte superior, con diámetro mayor en su base (15 km de longitud) y dos cráteres adventicios Olleta al oeste y Piraña al Este y un cráter activo conocido como Arenas (Rayo, 2012).

El vulcanismo de la Cordillera Central Colombiana se enmarca en un esquema tectónico complejo, generado por la interacción de las placas Suramericana, de Nazca y del Caribe. El proceso que tiene mayor incidencia en esta zona es la convergencia de la Placa Oceánica de Nazca bajo la Suramericana, que chocan de manera oblicua en este segmento de los Andes a velocidades de aproximadamente 54 mm por año, formando una trinchera sísmicamente activa y una zona con vulcanismo a lo largo del eje de la Cordillera Central (Rayo, 2012).

La Cordillera Central se caracteriza por ser una cadena que ha sufrido intensos plegamientos, fallamientos, levantamientos e intrusiones batolíticas de gran magnitud, haciéndose difícil dilucidar las relaciones estructurales y estratigráficas entre las distintas unidades de roca (González, 2001).

La historia eruptiva del Volcán Nevado del Ruíz inicia a aproximadamente hace 1.8 Ma y se encuentra dividida en tres estados: Ruiz Ancestral, Ruiz antiguo y Ruiz Presente. Estos estados consisten en la sucesiva construcción y destrucción del edificio volcánico, con el correspondiente emplazamiento de flujos de lava y domos andesíticos y dacíticos y la depositación de secuencias volcanosedimentarias y volcanoclásticas (Rayo, 2012).

Tres cráteres han estado activos durante el último periodo eruptivo, el cráter Olleta, el cráter Piraña y el cráter Arenas. El cráter Arenas ha sido la fuente de la actividad más reciente. Doce episodios eruptivos han ocurrido en los últimos 11000 años. Los depósitos volcánicos han sido generados por explosiones freáticas o freato-magmáticas más que por grandes erupciones magmáticas (Londoño et al., 2003).

La composición de los productos eruptivos del Volcán Nevado del Ruíz forma una serie que varía desde andesitas basálticas a dacitas. Esta serie es característica de volcanes calco-alcalinos asociados a fenómenos de subducción (Londoño et al., 2003).

El modelo actual para el sistema magmático del Volcán Nevado del Ruíz consiste en una cámara magmática tripartita. Un reservorio principal de magma con composición basáltica a aproximadamente 10 km de profundidad, que alimenta una cámara intermedia de composición dacítica a una profundidad de 6 km. Este depósito intermedio a su vez está conectado a una cámara andesítica poco profunda a aproximadamente 2 km de profundidad (González-García et al., 2015).

Litológicamente, el sector se encuentra dominado por la presencia de unidades metamórficas e ígneas con diferentes grados de deformación (Mejía et al., 2012) . El complejo de Cajamarca es el conjunto de rocas metafóricas que constituyen el núcleo de la cordillera central; varía ampliamente en composición y es el resultado de varios episodios metamórficos regionales, a las cuales se superponen efectos térmicos o dinámicos locales de intensidad variable (González, 2001). El complejo Quebradagrande es el conjunto de rocas volcánicas y sedimentarias que constituyen gran parte del flanco occidental de la Cordillera Central, al occidente de la falla San Jerónimo. Este complejo se caracteriza por interacciones de rocas volcánicas y sedimentarias con amplias variaciones litológicas tanto en la secuencia sedimentaria como en la relación entre fluidos volcánicos y capas piroclásticas (González, 2001). El stock de Manizales es un cuerpo de rocas granitoides que aflora al norte del Volcán Nevado del Ruíz y al este de la ciudad de Manizales. El stock presenta un intenso diaclasamiento que facilita la acción de agentes atmosféricos y son comunes los bloques redondeados en capas producto de la meteorización esferoidal (González, 2001). Los flujos andesíticos son una capa de gran espesor de rocas extrusivas que descansan sobre las rocas ígneas y metafóricas del basamento de la Cordillera Central (González, 2001).

3.5 Antecedentes

En Colombia, desde finales de la década de 1960, se empezaron a desarrollar investigaciones sobre los recursos geotérmicos del país. Estos estudios se han centrado principalmente en tres regiones: en la zona volcánica cercana a la frontera entre Colombia y Ecuador, en el área de Paipa e Iza y en el complejo Volcánico del Ruiz.

En 1968 la compañía italiana ENEL (*Ente Nazionale per la Energia Elettrica*), en colaboración con la CHEC (Central Hidroeléctrica de Caldas), realizaron el primer estudio geotérmico en el complejo volcánico de Ruiz. Esta investigación tenía como objetivo evaluar la situación geológica de la región con el fin de determinar la existencia de condiciones favorables para la circulación de fluidos que puedan ser usados en la generación de energía eléctrica (Alfaro et al., 2000).

Para la década de 1970, no se encontraron estudios realizados y publicados sobre los recursos geotérmicos del país.

En 1982, Organización Latino Americana de Energía (OLADE), Instituto Colombiano de Energía Eléctrica ICEL, Geotérmica Italiana S. R. L. y Consorcio Telecomunicaciones de Colombia (Contecol), realizaron un “Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia”, y definieron 9 áreas como sistemas geotérmicos potenciales, basados principalmente en estudios geológicos y geoquímicos. Se realizó una clasificación preliminar de las 9 áreas en alta, media y baja prioridad de exploración geotérmica. Los sistemas de prioridad alta fueron Chiles-Cerro Negro y el volcán Azufral. El área de Paipa e Iza y los volcanes Cumbal y Galeras se clasificaron como prioridad media, y los volcanes Doña Juana, Sotará, Puracé y Huila como prioridad baja (Alfaro et al., 2000).

En 1983 un estudio desarrollado por la CHEC en el complejo volcánico del Ruíz, permitió identificar tres áreas de prioridad para la perforación de pozos exploratorios: las Nereidas, Laguna del Otún y el volcán cerro Machín (Battocletti et al., 1999).

Posteriormente, en 1987, se realizó un estudio de prefactibilidad geotérmica en el sistema hidrotermal de Tufiño-Chiles-Cerro Negro, dirigido por la Organización Latino Americana de Energía (OLADE), el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) y el Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (ICEL). En esta investigación se propuso un modelo geotérmico para este sistema, basado en estudios geológicos, geoquímicos, hidrogeológicos y geofísicos (Alfaro et al., 2000).

El primer pozo exploratorio en Colombia, se realizó en 1997 en el sector las Nereidas, ubicado al occidente del volcán Nevado del Ruiz (VNR). El pozo estaba planeado para alcanzar una profundidad de 2000 m, pero sufrió una fuerte desviación de más de 42 grados, alcanzando solamente una profundidad de 1466 m (Monsalve et al., 1998). La perforación de este pozo, permitió identificar siete unidades litológicas con alteración hidrotermal variable.

En el año 2000, INGEOMINAS publicó el primer mapa geotérmico de Colombia, en el que se muestra la temperatura interpolada a 3 km de profundidad; dicha profundidad se seleccionó por ser una profundidad “económica”, es decir factible desde el punto de vista de costos de perforación (INGEOMINAS et al., 2000).

Las investigaciones más recientes (2010-2012) relacionadas con los recursos geotérmicos del Complejo Volcánico del Ruiz, se han desarrollado gracias a la colaboración entre ISAGEN, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la Universidad Nacional de Colombia, el Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), la Universidad Autónoma de México y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Dentro de estas investigaciones se incluye una caracterización de las alteraciones hidrotermales en el flanco Noroccidental del VNR realizada por Forero Herrera (2012), donde se evalúan las alteraciones hidrotermales mediante análisis petrográficos, difracción de rayos X y de isótopos estables en aguas termales. Mejía Toro (2012) propuso un esquema estructural que explica la localización de las fuentes termales y el tránsito de fluidos en el área del Volcán Nevado del Ruiz, a partir de la interpretación de fotografías aéreas, el análisis de rasgos morfológicos tectónicos, datos de estría de falla y el cálculo del campo de esfuerzo. Rayo Rocha (2012) construyó un modelo de la evolución geoquímica y térmica del volcán, a partir de análisis petrográficos cuantitativos y cualitativos, análisis microestructurales, análisis químicos en minerales y geoquímica de roca total. Este mismo año Rojas Sarmiento presentó un estudio de la relación entre la susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica y térmica del sistema volcánico Nevado del Ruiz, a partir del análisis e interpretación de información geofísica compuesta de geoelectrónica, magnetometría, magnetotelúrica y registros de pozos. Posteriormente, en el año 2013, Almaguer Rodríguez realizó un estudio magnetotelúrico en el sector norte del VNR, que permitió determinar espacialmente las zonas de alta conductividad eléctrica que generalmente están asociadas a temperaturas anómalas, de gran interés para la geotermia.

Uno de los artículos más recientes publicados por Mejía et al. (2014), hace una actualización de las investigaciones desarrolladas en el Complejo Volcánico del Ruiz, que incluyen:

1) la perforación de tres pozos exploratorios en el año 2011, que alcanzaron profundidades entre 174 hasta 300 m; 2) la construcción de un modelo conceptual geotérmico, y 3) la elección de la ubicación para perforar cinco nuevos pozos exploratorios con profundidades de 1700 a 2700 m. De acuerdo con Mejía et al. (2014) la siguiente etapa del proyecto, prevista para desarrollarse en los próximos dos años, es la perforación de estos pozos exploratorios y la evaluación de reservorio, el desarrollo de la planificación de campo y el diseño de la planta geotérmica. Se espera que la construcción y operación de una planta de 50 MW pueda estar lista para 2018 (Mejía et al. 2014).

Aunque en el país se han desarrollado investigaciones sobre los recursos geotérmicos desde la década de 1960, no se han encontrado estudios detallados publicados sobre los impactos ambientales que el aprovechamiento de estos recursos puede causar.

A nivel mundial se han publicado numerosos estudios sobre los principales impactos ambientales que generan las centrales geotérmicas. En Italia, Bravi et al. (2014) publicaron los resultados de una investigación que describe los impactos ambientales causados por cinco centrales geotérmicas. En el año 2002, Barbier publicó un resumen sobre el estado actual de la energía geotérmica, en el que se incluye una descripción de los impactos ambientales asociados a esta tecnología. En Colombia, el único estudio publicado sobre estos impactos fue realizado por Mejía (2013) quien presentó una metodología adaptada para la valoración de los impactos ambientales potenciales ocasionados por el aprovechamiento de energía geotérmica en el complejo Parque Natural Nacional de Los Nevados y su Zona de Amortiguación en las Áreas de Influencia de los Departamentos de Caldas y Risaralda.

4. Metodología

Esta investigación incluye un componente de trabajo de campo, un componente experimental, un componente de revisión bibliográfica y la aplicación de una metodología para calcular el potencial geotérmico. El trabajo de campo requirió de la elección previa de los puntos de muestreo, de acuerdo a sitios de interés en el área reportados en estudios anteriores (Forero (2012); (Mejía 2012); (Almaguer, 2013), y de la planeación de las rutas para tomar las muestras. Las rutas fueron elegidas considerando que solo se disponían de tres días para realizar el muestreo en un área rural a la que solo es posible acceder por carretera destapada, y en donde no era posible estimar el tiempo requerido para reali-

zar los recorridos planeados para encontrar los afloramientos y las fuentes termales donde se quería recolectar muestras.

Este trabajo presenta la metodología de medición de la conductividad térmica y la estimación de la capacidad calorífica de muestras de roca, así como la metodología de evaluación del potencial geotérmico del complejo volcánico del Ruíz. En toda la bibliografía revisada no se han encontrado estos elementos, que constituyen los aspectos más originales del trabajo realizado.

4.1 Trabajo de campo

Se seleccionaron 21 puntos de muestreo (figura 2) en la zona norte y noroccidental del volcán Nevado del Ruiz, con base en la ubicación de fuentes termales y sitios de muestreo reportados en investigaciones previas por Mejía (2012), Forero (2012) y Almaguer (2013). Los sitios de muestro fueron seleccionados teniendo en cuenta que se localizaron fuera del Parque Nacional Natural Los Nevados y próximos a una vía accesible.

La figura 2 muestra la ubicación de los 21 puntos de muestro sobre las planchas geológicas 206 y 225 de INGEOMINAS (Mosquera et al., 1998a; Mosquera et al., 1998b).

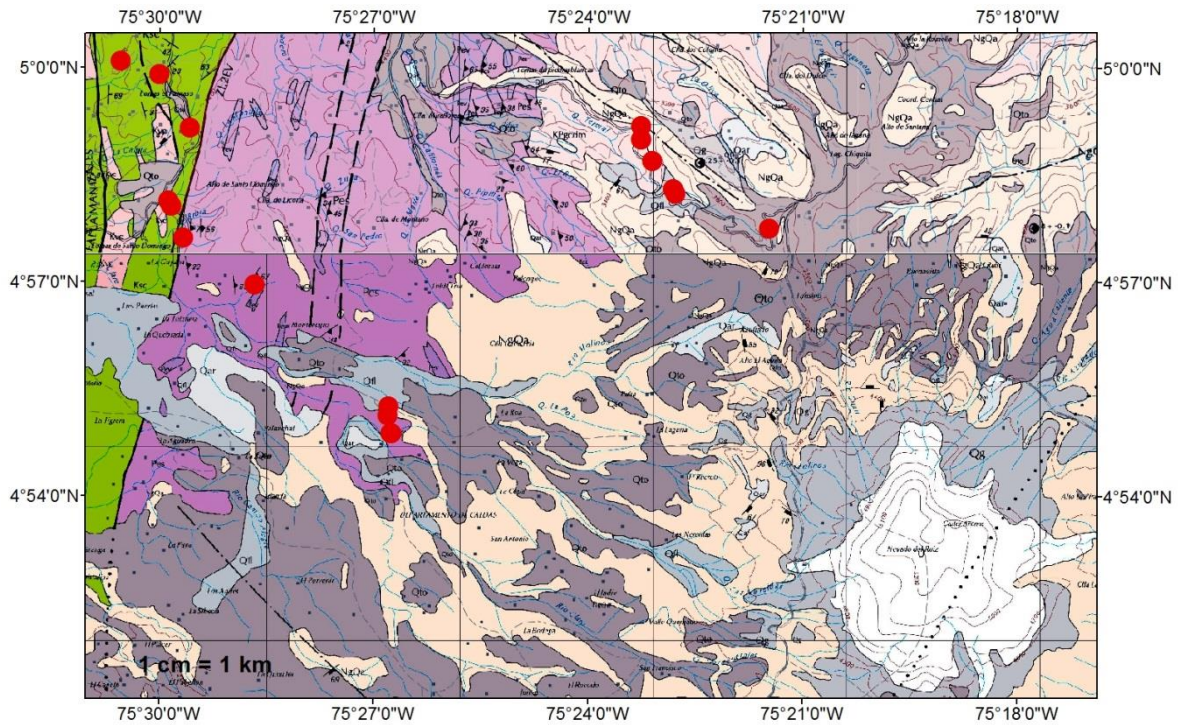


Figura 2: Ubicación puntos de muestreo en las planchas 206 y 225 (Mosquera et al., 1998a; Mosquera et al., 1998b).

El muestreo se realizó durante tres días en el mes de noviembre de 2014. Las muestras se recolectaron en afloramientos superficiales ubicados principalmente en cortes de carreteras y quebradas (figura 3). El muestreo se realizó por triplicado y finalmente se recolectaron 61 muestras para analizar (56 muestras de roca sólidas, 3 muestras fuertemente meteorizadas y 2 muestras fracturadas).



Figura 3: Afloramiento superficial en corte de carretera

4.2 Preparación de las muestras

Se realizó una caracterización mesoscópica de las muestras, con el fin de identificar los minerales observables a simple vista y determinar el tipo de roca y la unidad litológica de cada muestra, de acuerdo a las planchas geológicas 206 (Manizales) y 225 (Nevado del Ruiz) de INGEOMINAS.

Para la medición de la conductividad térmica se realizó una perforación de 4 mm de diámetro y al menos 6 cm de longitud en las muestras solidas (figura 4). En la medida de lo posible, la perforación se realizó en un costado plano y en la parte central de las muestras, para permitir la conducción de calor en todas las direcciones.



Figura 4: Perforación de 4 mm de diámetro para la medición de la conductividad térmica.

Algunas de las muestras también fueron cortadas para reducir su tamaño (figura 5), ya que los análisis de laboratorio se realizaron en el *Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau Terre et Environnement (INRS – ETE)* en Québec, y era necesario reducir el peso total de las muestras a enviar a Canadá. Finalmente se enviaron 61 muestras en dos cajas de aproximadamente 25 Kg cada una.



Figura 5: Corte de las muestras.

Las muestras que se encontraban fuertemente meteorizadas o fracturadas recibieron un tratamiento diferente, ya que no era posible realizar una perforación como la descrita anteriormente. Estas muestras fueron trituradas en fragmentos de aproximadamente 2 cm, y posteriormente reducidas hasta polvo muy fino utilizando un molino de discos giratorios (figura 6) disponible en el laboratorio de preparación de muestras del INRS – ETE.



Figura 6: Molino de discos rotatorios RS-200

4.3 Determinación de la conductividad térmica

La medición de la conductividad térmica se realizó utilizando un analizador de propiedades térmicas KD2 Pro (figura 7), de acuerdo al procedimiento descrito en *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure* de la ASTM (American Society for Testing and Materials); este método presenta un procedimiento para determinar la conductividad térmica de suelos y rocas suaves utilizando una fuente de calor transitoria.

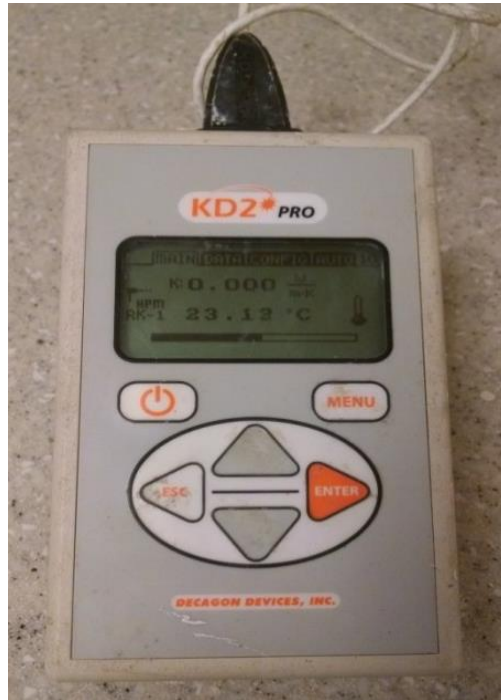


Figura 7: Analizador de propiedades térmicas KD2 Pro

La sonda KD2 Pro consiste en una aguja con un calentador y un sensor de temperatura. Para los análisis de conductividad térmica, una cantidad de calor es aplicada a través del calentador durante un periodo de tiempo, th , la temperatura es monitoreada en la aguja durante el calentamiento, y por un periodo de tiempo adicional igual a th , después del calentamiento. Un análisis de la temperatura de la sonda es usado para determinar la conductividad térmica (Decagon Devices Inc., 2008).

Las mediciones de conductividad térmica en las muestras solidas se realizaron con el sensor RK-1 (figura 8a), que es un sensor diseñado específicamente para mediciones en materiales duros, como rocas y concreto. La aguja de este sensor es de 60 mm de longitud y su diámetro es de 3.9 mm. Su utilización requiere la aplicación de grasa térmica para asegurar el buen contacto entre el sensor RK-1 y el material de prueba. Para las muestras en polvo se utilizó el sensor TR-1 (figura 8b), que tiene 100 mm de longitud y 2,4 mm de diametro. Este sensor esta diseñado para medir la conductividad termica de suelos, concreto y otros materiales granulares (Decagon Devices Inc., 2008).



Figura 8: a) sensor RK-1; b) sensor TR-1. Fuente: <http://www.decagon.com/products/thermal/accessories/tr-1-sensor/>

La determinación de la conductividad térmica se realizó utilizando la función de la sonda, *Auto Mode*, que permite definir el intervalo de medición para realizar mediciones automáticas. El tiempo requerido para monitorear la temperatura y determinar la conductividad térmica es de 10 minutos, sin embargo se utilizaron intervalos de medición de 1 hora, para permitir que la temperatura de la muestra regrese a equilibrio y evitar errores en las mediciones.

En las rocas solidas la medición de la conductividad térmica se hace directamente, introduciendo el sensor RK-1 en el orificio previamente perforado. Con las muestras en polvo se debe preparar una mezcla compacta formada por la muestra en polvo y una cantidad determinada de agua, que varía dependiendo de la composición de la roca (las muestras con arcillas requieren una cantidad de agua mayor para formar una mezcla compacta, y lo contrario ocurre con las muestras con mayor contenido de arena). Esta mezcla se deposita en un cilindro de 500 mililitros y se realiza la medición de la conductividad térmica utilizando el sensor TR-1.

Las mediciones que se obtienen con la sonda pueden verse afectadas por la técnica experimental, así que para disminuir los errores que se pueden generar en esta determinación se realizó lo siguiente: 1) cubrir el sensor con grasa térmica (para las mediciones realizadas con el sensor RK-1), 2) introducir la sonda en la muestra y verificar que no quede ninguna parte de la sonda expuesta y esperar al menos 15 minutos antes de comenzar la medición, para permitir que la temperatura de la sonda y la muestra se equilibre, 3) realizar al menos 7 mediciones de conductividad térmica para cada muestra y cal-

cular el valor final como el promedio de las mediciones (en este promedio se excluye el primer dato porque es el valor que se puede ver más afectado por la resistencia de contacto entre el sensor y la muestra).

4.3.1 Factor de corrección

De acuerdo al método de la ASTM para determinar la conductividad térmica, el instrumento de medición debe ser calibrado antes y después de cada medición. Esta calibración se realiza determinando un factor de corrección C que compara la conductividad térmica de un material estándar de conductividad térmica conocida, con el valor obtenido de manera experimental.

$$C = \frac{\lambda_{material}}{\lambda_{medido}} \quad (1)$$

Este factor es utilizado para corregir los datos de conductividad térmica medidos. La sonda KD2 Pro incluye un cilindro de plástico (figura 9) como material estándar y un certificado de garantía de calidad con el valor la conductividad térmica de este material.



Figura 9: Cilindro plástico de conductividad térmica conocida

4.3.2 Tratamiento de datos

Las mediciones realizadas en las muestras solidas dan como resultado la conductividad térmica de la roca, que se corrige utilizando el factor C mencionado en la sección precedente, antes de calcular el promedio de todas las mediciones para determinar la conductividad térmica representativa de la muestra.

En el caso de las mediciones en polvo, el dato obtenido con la sonda es la conductividad térmica de la mezcla sólido - agua - aire (ecuación 2) por lo tanto para conocer la conductividad térmica de la muestra es necesario despejar

$$\lambda_s \lambda_m = \lambda_s^{n_s} \times \lambda_w^{n_w} \times \lambda_{aire}^{n_{aire}} \quad (2)$$

λ_m : conductividad térmica de la mezcla (w/mK)

λ_s : conductividad térmica de la muestra solida (w/mK)

n_s : fracción de sólido (%)

λ_w : conductividad térmica del agua (w/mK)

n_w : fracción de agua (%)

λ_{aire} : conductividad térmica del aire (w/mK)

n_{aire} : fracción de aire (%)

La conductividad del agua y el aire son datos conocidos y la porosidad de las tres fases se puede calcular de la siguiente manera:

$$n_s = 1 - n \quad (3)$$

$$n_w = n \times S_r \quad (4)$$

$$n_{aire} = n \times (1 - S_r) \quad (5)$$

donde n es la porosidad de la mezcla preparada y S_r su grado de saturación. Estas variables se determinan usando las relaciones definidas en geotecnia para caracterizar los suelos:

$$n = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_s \times (1 + w)} \quad (6)$$

$$S_r = \frac{\gamma \times \gamma_s \times w}{((1 + w) \times \gamma_s - \gamma) \times \gamma_w} \quad (7)$$

W : contenido de agua, $w = \frac{\text{masa de agua}}{\text{masa solida}}$

γ : densidad de la mezcla $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

γ_s : densidad del esqueleto solido $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

γ_w : densidad del agua $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$

Finalmente se determina la conductividad térmica de la muestra en polvo usando la ecuación 8.

$$\lambda_s = \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_w^{n_w} \times \lambda_{aire}^{n_{aire}}} \right)^{\frac{1}{n_s}} \quad (8)$$

Los datos se corrigen usando el factor de corrección C y se calcula la conductividad térmica de la muestra como el promedio de las mediciones realizadas en cada muestra, como se realizó para las muestras sólidas.

4.4 Estimación de la capacidad calorífica

La estimación de la capacidad calorífica de las muestras se realizó con base en los valores de capacidad calorífica publicados por Waples et al. (2004) para los diferentes tipos de rocas y de acuerdo a la caracterización mesoscópica de las muestras, ya que no se contaba con la información necesaria para determinar la capacidad calorífica de cada muestra.

4.5 Estimación de la capacidad calorífica y conductividad térmica para las formaciones litológicas

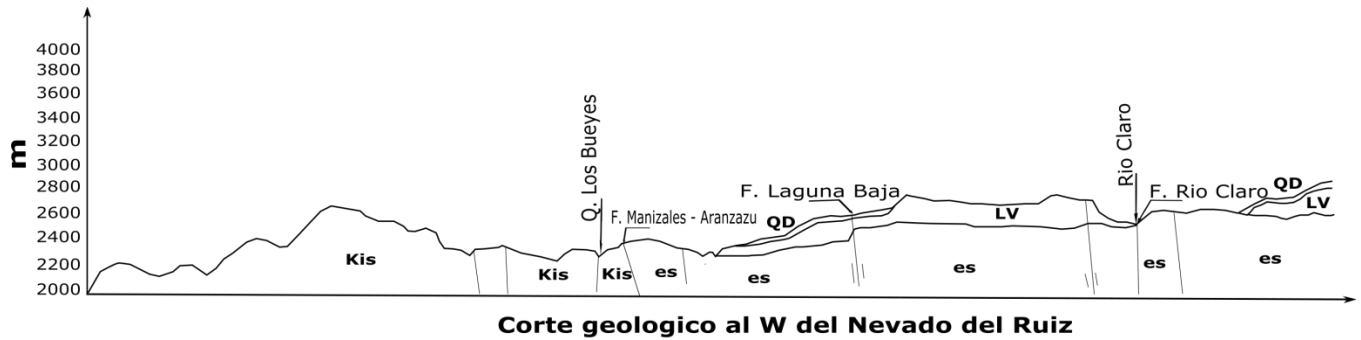
Las muestras fueron organizadas en grupos según su formación litológica para calcular un valor único de conductividad térmica y capacidad calorífica para cada formación. Este valor se calculó utilizando la medida de tendencia central (media o mediana) que mejor representara la conductividad térmica y la capacidad calorífica de cada unidad. Se utilizó la mediana en los grupos en los que se presentaban valores mucho más altos o más bajos que los demás, ya que la mediana es una medida que no se ve tan afectada por los datos extremos y entonces en este tipo de casos es la medida que mejor representa los datos del conjunto. La media se utilizó en los grupos en los que no había una gran variación entre los datos.

4.6 Perfil geológico inferido

En el área de estudio se trazó un perfil ubicado entre los puntos de muestreo y los pozos exploratorios existentes en la zona, los cuales constituyen una fuente de información importante para la estimación del potencial geotérmico.

Con base en las planchas 206 (Manizales) y 225 (Nevado del Ruiz) de INGEOMINAS y la memoria explicativa de las mismas, se construyó un primer perfil geológico inferido del área de estudio.

Posteriormente, con la ayuda de un mapa geológico de la zona, realizado por Central Hidroeléctrica de Caldas et al. (1983) como parte de la Investigación Geotérmica Macizo volcánico del Ruiz, y con una perfil geológico de la zona (figura 10) publicado en esta misma investigación se logró realizar una mejor aproximación de los espesores de las formaciones en el perfil construido.



Kis: Complejo sedimentario Aranzazu-Manizales
es: Grupo Cajamarca
LV: Lavas Antiguas (composición basáltica a andesita-basáltica)
QD: Derrubios de pendiente, depósitos detríticos varios, depósitos piroclásticos retrabajados

Figura 10: Perfil geológico. Modificado de Central Hidroeléctrica de Caldas et al. (1983)

4.7 Temperatura a profundidad

La temperatura a profundidad fue estimada a lo largo del perfil trazado en el área de estudio, de acuerdo a la ley de Fourier (ecuación 9):

$$q = -\lambda \times \frac{dT}{dz} \quad (9)$$

donde q es el flujo de calor ($\frac{W}{m^2}$), λ es la conductividad térmica ($\frac{W}{m \cdot K}$) y $\frac{dT}{dz}$ el gradiente de temperatura.

Partiendo de la ecuación anterior es posible calcular la temperatura a profundidad (T_p) así:

$$T_p = T_0 + q \times \frac{dz}{-\lambda} \quad (10)$$

La conductividad térmica de cada formación litológica es un dato conocido proveniente de los análisis de laboratorio, el flujo de calor (q) se asumió como un valor constante igual a $187,31 \frac{mW}{m^2}$ a lo largo del perfil. Este valor fue estimado utilizando los datos de temperatura de dos pozos exploratorios de 300m realizados en el área en el año 2011 (Rojas, 2012).

La temperatura en superficie se calculó utilizando un gradiente de temperatura de 0,6425 °C por cada 100 m, este valor corresponde al promedio del gradiente de temperatura mensual para la región andina publicado por (Barón, 2003).

La temperatura a profundidad se calculó en puntos ubicados cada 200 m a lo largo del perfil como se muestra en la figura 11.

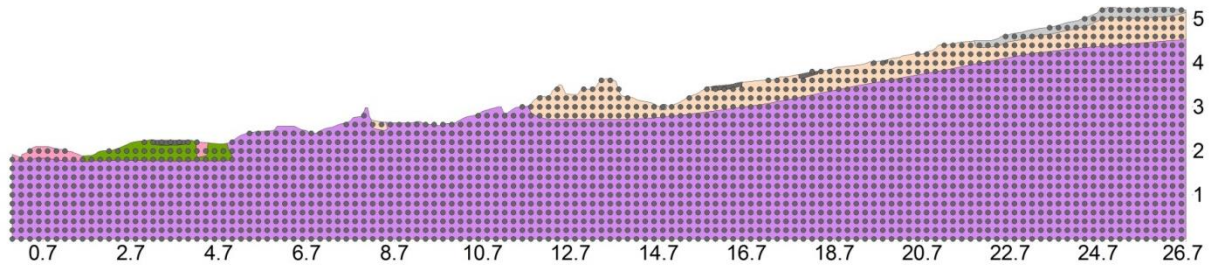


Figura 11: Puntos ubicados cada 200 m a lo largo del perfil

4.8 Evaluación de recursos

Para determinar el potencial geotérmico, inicialmente se estimó la cantidad de calor contenida en el subsuelo en cada punto del perfil utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_r = \rho \times C \times A \times (T_r - T_0) \quad (11)$$

Q_r : cantidad de calor disponible en el subsuelo ($J m^{-1}$)

ρ : densidad de la roca ($Kg m^{-3}$)

C : capacidad calorífica de la roca ($J Kg^{-1} K^{-1}$)

A : área (m^2)

T_r : temperatura a profundidad (K)

La ecuación 11 da como resultado la cantidad total de calor almacenada en el subsuelo, que permite estimar el potencial geotérmico (P_G) en $MW km^{-1}$ de acuerdo a la ecuación 12:

$$P_G = R \times \frac{Q_r}{t} \quad (12)$$

donde R es un factor de recuperación que relaciona la energía utilizable y la energía disponible (Calcagno et al., 2014) y depende de la porosidad y la permeabilidad de las formaciones litológicas del reservorio (Walsh, 2013); y t es el tiempo de explotación de los recursos.

El potencial geotérmico se calculó utilizando un tiempo de explotación del reservorio de 30 años y un factor de recuperación $R = 2,4 \%$ que es un valor reportado por Calcagno et al. (2014) como el mínimo factor de recuperación para acuíferos fracturados.

Utilizando las ecuaciones 11 y 12 se obtiene la cantidad de calor en el subsuelo en J m^{-1} y el potencial geotérmico en MW km^{-1} , ya que con el perfil del área de estudio solo es posible calcular el área; sin embargo, para obtener una estimación del potencial geotérmico en MW se asumió un espesor de las formaciones litológicas de 5 km.

4.9 Identificación de impactos ambientales asociados a proyectos geotérmicos en zonas volcánicas

Se realizó una revisión bibliográfica sobre los principales impactos ambientales causados por centrales geotérmicas ubicadas en zonas volcánicas. Se seleccionaron 3 centrales geotérmicas donde algunos de los impactos han sido cuantificados y se realizó una comparación.

4.10 Marco normativo colombiano aplicable al aprovechamiento de recursos geotérmicos

Se realizó una revisión bibliográfica del marco normativo colombiano que se aplicaría para la exploración y explotación de los recursos geotérmicos del país, como una fuente no convencional de generación de energía.

5 Resultados y discusión

5.1 Caracterización mesoscópica

En la tabla 3 se presenta una descripción general de las muestras tomadas en cada punto de muestreo.

Tabla 3: Caracterización mesoscópica de las muestras

Código	Formación litológica	Caracterización mesoscópica	Código	Formación litológica	Caracterización mesoscópica
2014 MI 1	Complejo Quebradagrande (Ksc)	Arenisca feldespática, con presencia de óxidos de manganeso.	2014 MI 12	Andesitas (NgQa)	Andesita porfirítica. Presenta cuarzo, azufre, plagioclasas y piroxenos.
2014 MI 2	Complejo Quebradagrande (Ksc)	Arenisca feldespática, altamente meteorizada. Presenta óxidos de manganeso.	2014 MI 13	Andesitas (NgQa)	Andesita porfirítica. Presenta cuarzo, azufre, plagioclasas y piroxenos. Presenta pirita como mineral accesorio.
2014 MI 3	Complejo Quebradagrande (Ksc)	Arenisca con evidencias de metaformismo. Alto grado de foliación.	2014 MI 14	Flujo de lodo volcánico (Qfl)	Depósitos de flujo de lodos volcánico. Presencia de vesículas y fragmentos de roca de tamaños variables.
2014 MI 4	Complejo Quebradagrande (Ksc)	Esquisto arcilloso completamente fracturado. Presenta algunos cristales de cuarzo en las ranuras.	2014 MI 15	Flujo de lodo volcánico (Qfl)	Sobre las muestras se observa lodos de color oscuro y grisáceo, con presencia abundante de azufre. Compuesta por cenizas de color oscuro y grisáceos. Presenta arenas y bloques fuertemente meteorizados.
2014 MI 5	Complejo Quebradagrande (Ksc)	Esquisto arcilloso. Presenta cristales de cuarzo y azufre. Contiene grafito.	2014 MI 16	Andesitas (NgQa)	Se observa cuarzo bien cristalizado, y un mineral negro que parece biotita. Se encuentra meteorizada, presta raíces y óxidos de manganeso.
2014 MI 6	Complejo de Cajamarca (Pes)	Cuarzo filita con foliación definida. Presenta azufre.	2014 MI 17	Complejo de Cajamarca (Pes)	Filita cuarzosa. Mineral predominante cuarzo.
2014 MI 7	Complejo de Cajamarca (Pes)	Esquisto micáceo. Presenta cuarzo.	2014 MI 18	Andesitas (NgQa)	Fragmentos volcánicos. Presenta azufre, cuarzo y horblenda cristalizada en las fisuras (minerales tardíos).

2014 MI 8	Andesitas (NgQa)	Flujo volcánico, con algunos cristales que se observan a simple vista, vesículas y una masa gris oscura que le da homogeneidad.	2014 MI 19	Andesitas (NgQa)	Andesitas, con presencia de azufre cristalizado.
2014 MI 9	Stock de Manizales (Kpgcdm)	Diorita. Presenta cuarzo, plagioclasas y biotita. Muestras altamente meteorizadas.	2014 MI 20	Complejo de Cajamarca (Pes)	Esquisto micáceo con alto contenido de cuarzo. Presenta grafito y azufre. Esta intensamente fracturado. Tiene micas de moscovita
2014 MI 10	Stock de Manizales (Kpgcdm)	Diorita. Presenta cuarzo, plagioclasas y biotita.	2014 MI 21	Complejo de Cajamarca (Pes)	Esquisto micáceo con alto contenido de cuarzo. Presenta grafito y micas de clorita. Bastante foliada y plegada.
2014 MI 11	Stock de Manizales (Kpgcdm)	Diorita. Presenta cuarzo, plagioclasas y biotita. Muestra poco meteorizada.			

5.2 Conductividad térmica y capacidad calorífica

La tabla 4 muestra los resultados de las mediciones de conductividad térmica, realizadas utilizando la sonda KD2 Pro, y los valores estimados de la capacidad calorífica.

Tabla 4: Resultados análisis de conductividad térmica y capacidad calorífica

Código	Conductividad térmica (W/mK)		Capacidad calorífica (J/Kg*K)	Código	Conductividad térmica (W/mK)		Capacidad calorífica (J/Kg*K)
	Muestra	Punto de muestreo			Muestra	Punto de muestreo	
2014 MI 1 A	1,9593	1,9829	775	2014 MI 12 A	1,4536	1,3356	815
2014 MI 1 B	1,8446			2014 MI 12 B	1,2176		
2014 MI 1 C	2,1448						
2014 MI 2 A	0,8736	1,1481	775	2014 MI 13 A	0,9162	0,9089	815
2014 MI 2 B	1,0728			2014 MI 13 B	0,9187		
2014 MI 2 C	1,498			2014 MI 13 C	0,8919		
2014 MI 3 A	3,5826	2,6342	910	2014 MI 14 A	2,9505	1,5946	815

2014 MI 3 B	2,2237			2014 MI 14 B	0,7744		
2014 MI 3 C	2,0963			2014 MI 14 C	1,0589		
2014 MI 4 A	Medición no representativa*	-	860	2014 MI 15 A	Medición no representativa*	2,1793	840
2014 MI 4 B	Medición no representativa*			2014 MI 15 B	Medición no representativa*		
2014 MI 4 C	Medición no representativa*			2014 MI 15 C	2,1793		
2014 MI 5 A	3,8107	4,2611	860	2014 MI 16 A	5,4877	3,2881	815
2014 MI 5 B	-			2014 MI 16 B	1,0885		
2014 MI 5 C	4,7115			2014 MI 16 C	Medición no representativa*		
2014 MI 6 A	2,7575	3,1790	1090	2014 MI 17 A	Medición no representativa*	2,7488	1090
2014 MI 6 B	3,4034			2014 MI 17 B	2,4124		
2014 MI 6 C	3,3761			2014 MI 17 C	3,0852		
2014 MI 7 A	Medición no representativa*	2,8927	790	2014 MI 18 A	1,0623	1,1209	815
2014 MI 7 B	2,7146			2014 MI 18 B	1,1741		
2014 MI 7 C	3,0708			2014 MI 18 C	1,1264		
2014 MI 8 A	1,2389	1,3371	815	2014 MI 19 A	Medición no representativa*	1,0777	815
2014 MI 8 B	1,2389			2014 MI 19 B	1,0468		
2014 MI 8 C	1,5335			2014 MI 19 C	1,1085		
2014 MI 9 A	Medición no representativa*	-	1140	2014 MI 20 A	3,2216	2,8676	790
2014 MI 9 B	Medición no representativa*			2014 MI 20 B	Medición no representativa*		
2014 MI 9 C	Medición no representativa*			2014 MI 20 C	2,5135		
2014 MI 10 A	2,2679	2,1229	1140	2014 MI 21 A	Medición no representativa*	3,2192	790
2014 MI 10 B	Medición no representativa*			2014 MI 21 B	Medición no representativa*		
2014 MI 10 C	1,9778			2014 MI 21 C	3,2192		
2014 MI 11 A	2,697	2,3066	1140	<i>*Mediciones realizadas en muestras en polvo</i>			
2014 MI 11 B	2,0885						
2014 MI 11 C	2,1342						

De acuerdo a (Clauser, 2011) la conductividad térmica de las rocas varía de acuerdo al contenido de minerales, la porosidad, los fluidos en los poros, la saturación y la anisotropía. Esto se ve reflejado en las mediciones realizadas en las muestras, ya que en algunos casos la conductividad térmica fue bastante distinta en las muestras tomadas en un mismo punto. En las muestras 16 A y 14 A (figura 12) se obtuvo un valor de conductividad térmica considerablemente mayor que en las otras muestras tomadas en el mismo punto, una explicación para esta diferencia está en los valores es que estas dos muestras tenían un mayor contenido de cuarzo, que es uno de los minerales con mayor conductividad térmica.

Las mediciones no representativas corresponden a las que fueron realizadas con las muestras en polvo y que dieron como resultado valores de conductividad térmica muy elevados. Estos valores no corresponden a los rangos de conductividad térmica reportados en la literatura para las diferentes tipos de rocas. La determinación de la conductividad térmica en este caso requería de una mayor manipulación de las muestras y de la determinación de variables como el contenido de agua y la densidad de la mezcla, en las cuales se pudo incurrir en errores experimentales. Por esta razón las mediciones realizadas en las muestras en polvo se consideraron como no representativas.



Figura 12: a) muestra 16 A; b) muestra 14 A

En la tabla 5 se muestran los valores de conductividad térmica y capacidad calorífica estimados para cada unidad litológica con base en las muestras tomadas en estas. Estos valores fueron calculados como la media de los valores obtenidos para las muestras tomadas en cada unidad, a excepción de la conductividad térmica de la formación de Andesitas que fue calculada usando la mediana. En este caso se utilizó la mediana porque se considera que es la medida de tendencia central que representa mejor los datos de esta unidad, ya que la conductividad térmica de la muestra 16 es más elevada que la de las demás muestras y la media se ve considerablemente afectada por este valor extremo.

En la determinación de la conductividad térmica del Complejo Quebradagrande se excluyó la conductividad térmica de la muestra 5, ya que fue tomado en una zona de falla que no representa las características generales del complejo.

Tabla 5: Conductividad térmica y capacidad calorífica por unidad litológica

Unidad litológica	Conductividad Térmica (W/m ² *K)			Capacidad Calorífica Estimada (J/Kg*K)	
	Código	Punto de muestreo	Unidad litológica	Punto de muestreo	Unidad litológica
Complejo Quebradagrande. Miembro sedimentario (Ksc)	2014 MI 1	1,9829	1,9217	775	830
	2014 MI 2	1,1481		775	
	2014 MI 3	2,6342		910	
	2014 MI 5	4,2611		860	
Andesitas (NgQa)	2014 MI 8	1,3371	1,2283	815	815
	2014 MI 12	1,3356		815	
	2014 MI 13	0,9089		815	
	2014 MI 16	3,2881		815	
	2014 MI 18	1,1209		815	
	2014 MI 19	1,0777		815	
Stock de Manizales (KPgcdm)	2014 MI 10	2,1229	2,2147	1140	1140
	2014 MI 11	2,3066		1140	
Flujo de lodo volcánico (Qfl)	2014 MI 14	1,5946	1,8870	840	840
	2014 MI 15	2,1793		840	
Complejo de Cajamarca (Pes)	2014 MI 6	3,1790	2,9815	1090	910
	2014 MI 7	2,8927		790	
	2014 MI 17	2,7488		1090	
	2014 MI 20	2,8676		790	
	2014 MI 21	3,2192		790	

Los valores de conductividad térmica obtenidos para el Complejo Quebradagrande, el Stock de Manizales y los Flujos de lodo volcánico no mostraron una gran variación: la mayor parte de los valores fueron cercano a $2.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (figura 13). La formación de Andesitas presento la conductividad térmica más baja: $1,2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ y el Complejo de Cajamarca presento el valor más alto de $2.9 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Los valores de capacidad calorífica variaron en un rango de 815 y $1140 \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$, con un valor promedio de $907 \text{ JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$.

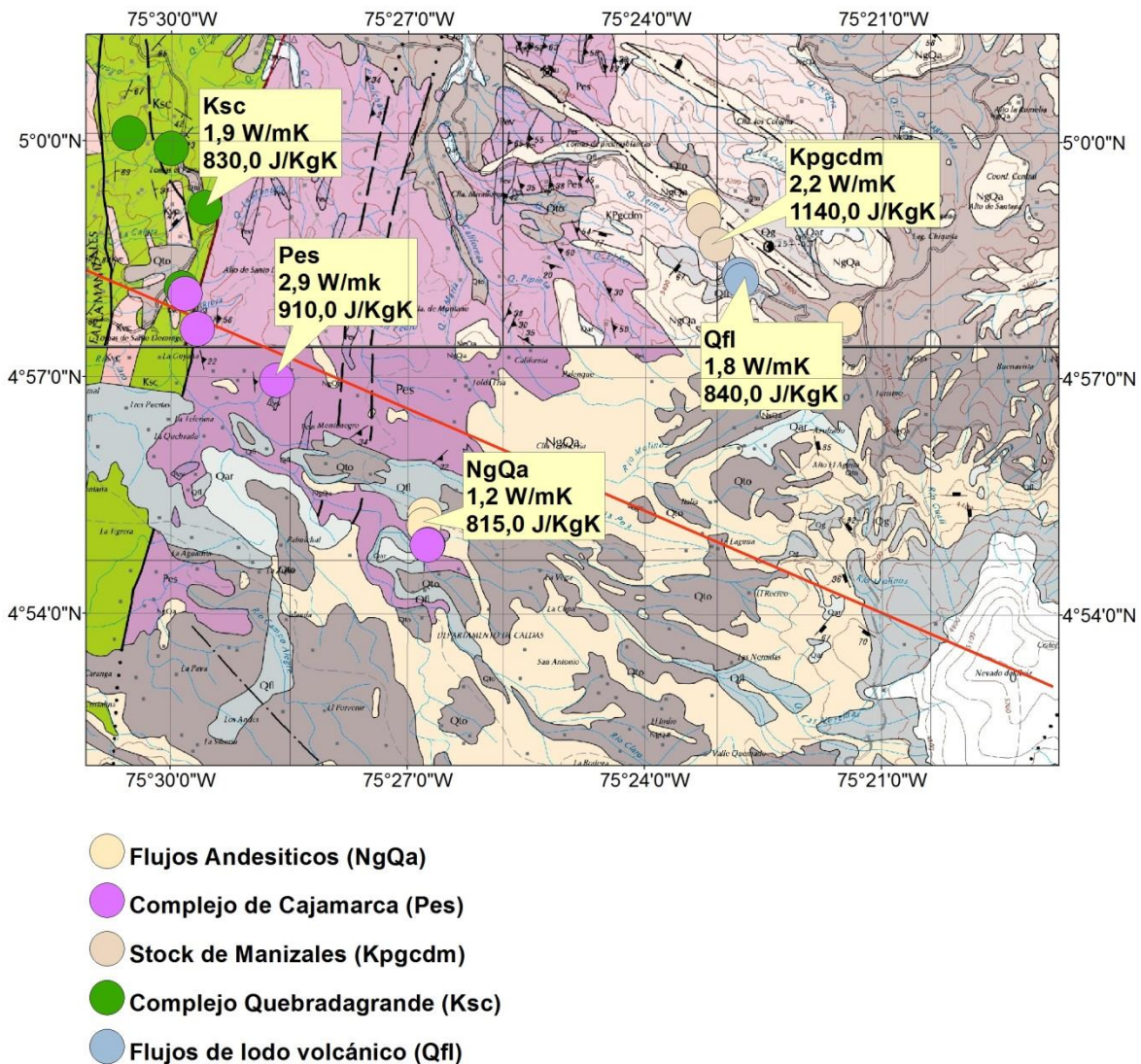


Figura 13: Resultados análisis de conductividad térmica y capacidad calorífica. Puntos de muestreo ubicados en las planchas 206 y 225 de INGEOMINAS.

5.3 Perfil geológico inferido

El perfil A (figura 14) cubre la zona norte del área de estudio que se encuentra en el límite del Parque Nacional Natural (PNN) Los Nevados, y atraviesa uno de los afloramientos del stock de Manizales (Kpgcdm).

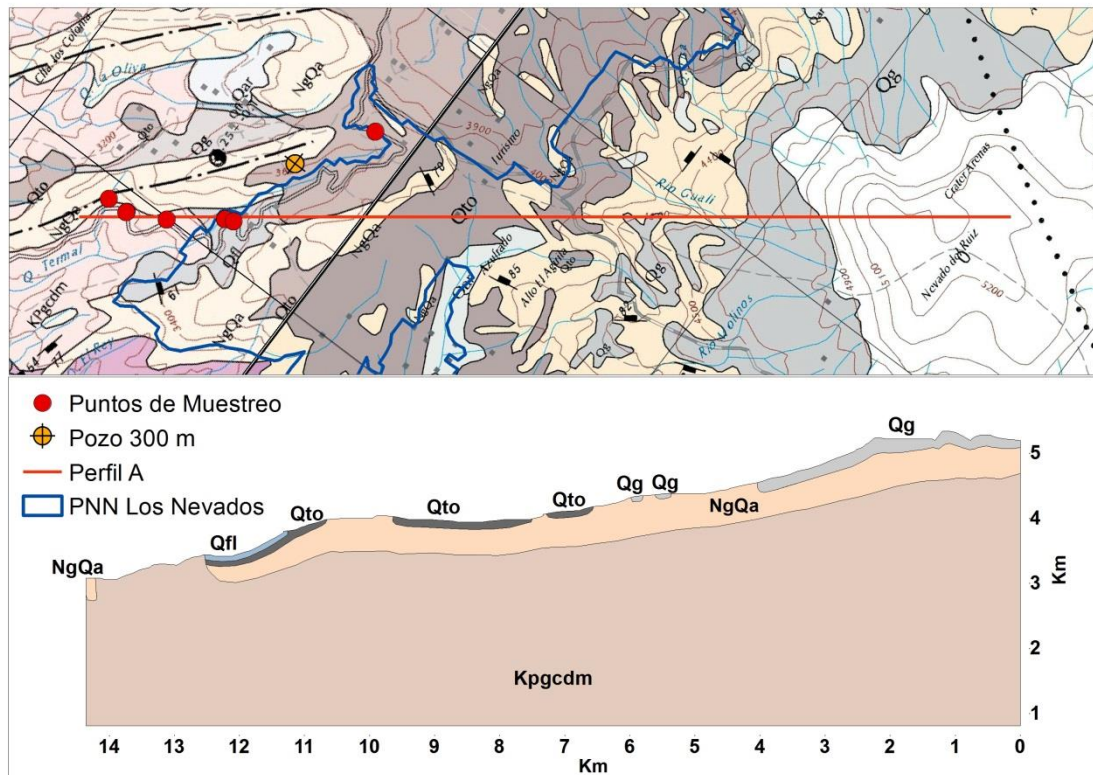


Figura 14: Perfil A

El perfil B (figura 15), se encuentra en el flanco occidental del nevado, este corte cubre un área mayor, y en él se observan los afloramientos del complejo Quebradagrande y del complejo de Cajamarca (Pes). Sobre este último complejo descansa una capa de flujos andesíticos (NgQa) de aproximadamente 500 m de espesor (Central Hidroeléctrica de Caldas et al., 1983). En ambos perfiles se observan los diferentes depósitos superficiales producto de la actividad volcánica del periodo cuaternario.

Se eligió el perfil B para realizar la estimación de la temperatura a profundidad, ya que este abarca un área mayor fuera del Parque Nacional Natural Los Nevados y se encuentra más cerca de la zona Nereidas, una de las áreas identificadas por su potencial geotérmico en el estudio de perfectibilidad realizado por (Central Hidroeléctrica de Caldas et al., 1983), y es el área en la que se perforó el primer pozo exploratorio del complejo volcánico del Ruiz (pozo Nereidas) descrito por Monsalve et al. (1998).

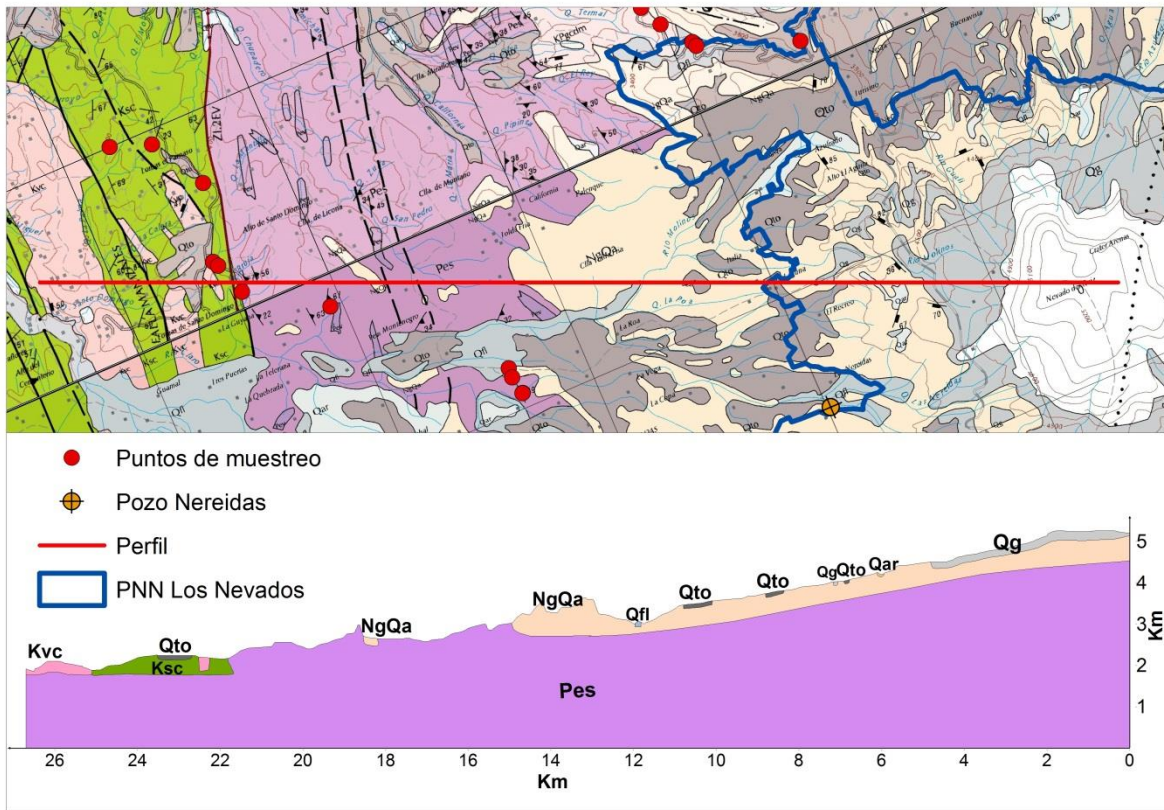


Figura 15: Perfil B

5.4 Estimación de la temperatura a profundidad

La estimación de la temperatura a profundidad se realizó en puntos ubicados cada 200 m a lo largo del perfil (Figura 16). La temperatura varía desde 0 a 19 °C en la parte superficial del perfil, y de 135 a 405 °C en la parte inferior del perfil. Las temperaturas superiores a 200 °C se presentan a una distancia máxima de 15 km desde el eje del volcán. Desde este punto la temperatura empieza a aumentar hasta llegar a una temperatura máxima de 401 °C en la zona más cercana al volcán y a una profundidad de aproximadamente 5200 m.

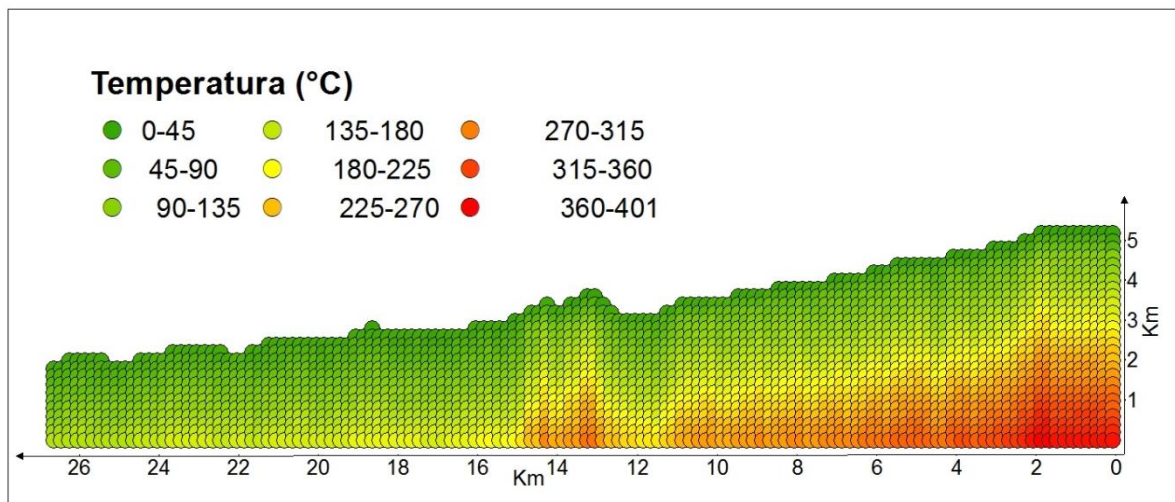


Figura 16: Temperatura a profundidad a lo largo del perfil B

5.5 Evaluación de recursos

La evolución del potencial geotérmico se realizó en el área del perfil que presentó una temperatura superior a 200 °C (figura 17). Estas temperaturas se obtuvieron en puntos ubicados sobre el Complejo de Cajamarca (Pes), específicamente en la zona del perfil donde, en la parte superior de este complejo, se encuentra una capa de flujos andesíticos (NgQa). Esto se debe a que el Complejo de Cajamarca tiene una conductividad térmica alta que favorece la transferencia de calor, mientras que los flujos andesíticos tienen una conductividad térmica menor que impiden que el calor fluya hacia la superficie.

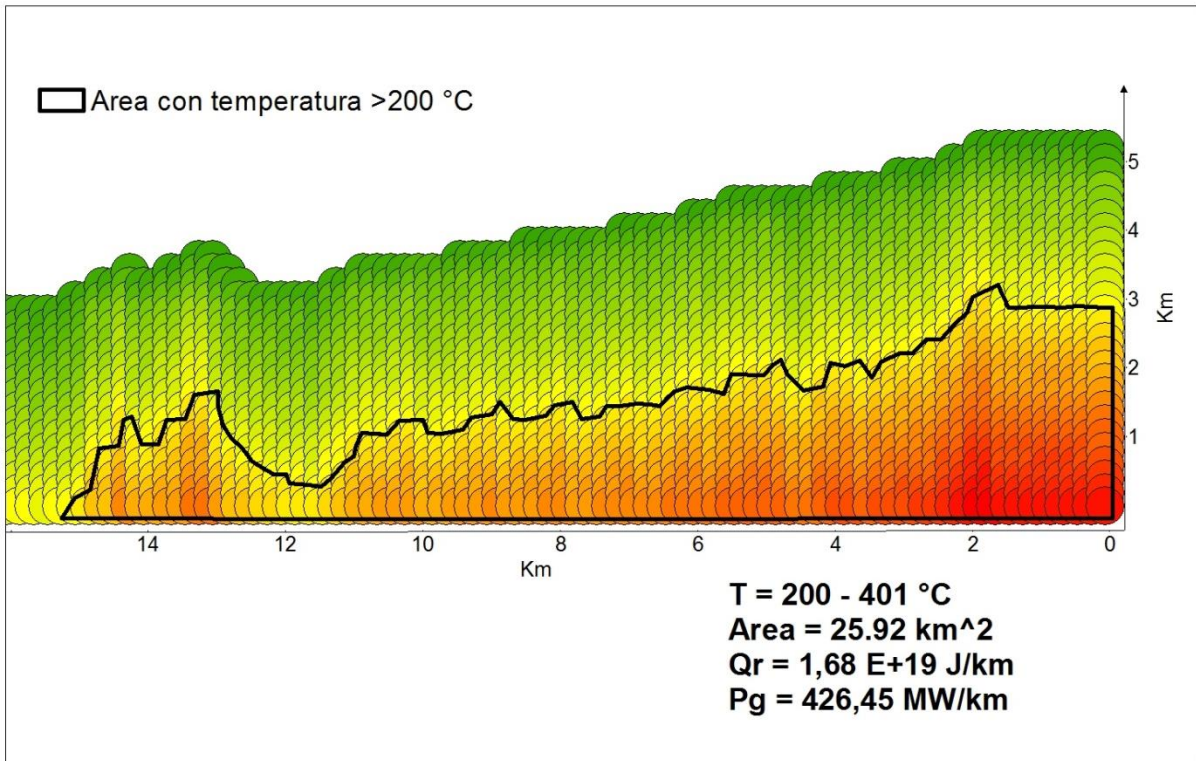


Figura 17: Estimación potencial geotérmico del área con T > 200°C

Una parte del área identificada en la figura 17 pertenece al PNN Los Nevados y no puede ser intervenida para explotar los recursos disponibles. Entonces el potencial geotérmico se volvió a calcular en el área con temperatura superior a 200 °C que se encuentra fuera

del PNN (figura 18). Finalmente se limitó el área más cercana a la superficie, fuera del PNN Los Nevados y con las mismas condiciones de temperatura (figura 18) donde el aprovechamiento de los recursos geotérmicos podría ser ambiental y económicamente viable, ya que no tiene las restricciones de una área protegida y se encuentra a una profundidad de aproximadamente 2,5 km.

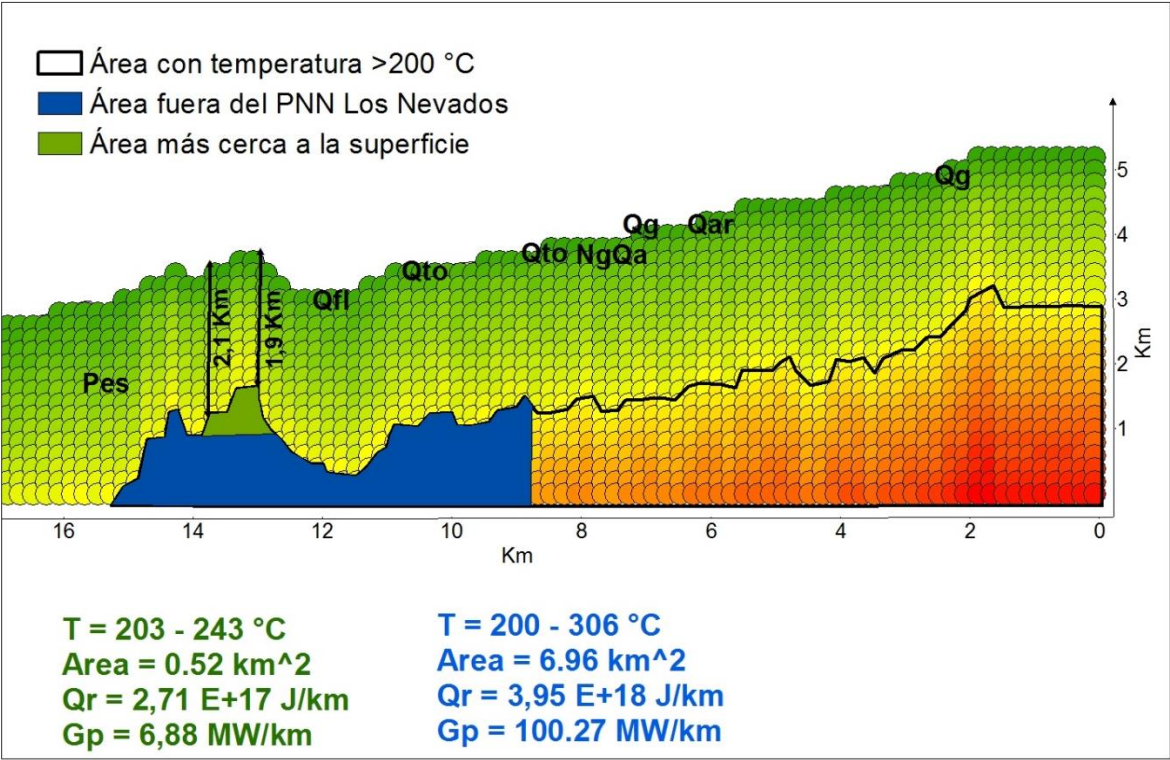


Figura 18: Potencial geotérmico áreas fuera del PNN Los Nevados

El potencial geotérmico estimado por unidad de longitud para la zona fuera del PNN los nevados es de 100 MW/km y de 6,88 MW/km para el área más cercana a la superficie. El potencial neto en MW depende del espesor de las formaciones litológicas a profundidad y puede variar considerablemente de acuerdo a este valor. Asumiendo un espesor de 5 km para el Complejo de Cajamarca, que corresponde al mínimo espesor de esta formación en superficie a los lados del perfil, se obtuvo un potencial de 2132 MW para el área con temperatura superior a 200 °C, de 501 MW para el área fuera del PNN los nevados, y de 34 MW para el área más cercana a la superficie.

5.6 Impactos ambientales asociados a proyectos geotérmicos en zonas volcánicas

La energía geotérmica es una fuente de energía renovable, sin embargo es necesario identificar y cuantificar los impactos que las centrales geotérmicas pueden generar en el ambiente, para implementar las medidas de prevención, mitigación y control necesarias, que permitan asegurar que la explotación de estos recursos sea sostenible.

Todos los posibles impactos ambientales y las medidas de control previstas deben ser claramente identificados antes de comenzar el proyecto. Es entonces necesario tener un conocimiento del comportamiento natural de la zona y monitorear el campo varios años antes del desarrollo del proyecto (Kristmannsdóttir et al., 2003).

A partir de la revisión bibliográfica realizada sobre los impactos ambientales causados por centrales geotérmicas en zonas volcánicas, se seleccionaron tres centrales geotérmicas en las cuales se han cuantificado algunos de los principales impactos ambientales asociados a la explotación de los recursos geotérmicos (tabla 6).

Tabla 6: Algunos impactos ambientales causados por las tres centrales geotérmicas consideradas: Cerro Prieto (México), Mount Amiata (Italia) y Miravalles (Costa Rica).

Campo geotérmico	Cerro Prieto (México) 280 - 350 °C	Mount Amiata (Italia) 300 - 350 °C	Miravalles (Costa Rica) 240°C
Capacidad instalada (MW)	520	88	50
Emisiones de CO ₂ (Kg/MW)	98,79 ¹	497 ¹	49,56
Emisiones de H ₂ S (Kg/MW)	2,28 ¹	3,24 ¹	0,325
Emisiones de CH ₄ (Kg/MW)	1,98 ¹	<i>Sin información</i>	<i>Sin información</i>
Emisiones de NH ₄ ⁺ (Kg/MW)	<i>Sin información</i>	6,54 ¹	<i>Sin información</i>

Trazas de Hg (g/MW)	<i>Sin información</i>	0,72*10 ⁻³ ¹	<i>Sin información</i>
Ruido (dB)	<i>Sin información</i>	<i>Sin información</i>	80 - 110
Disposición de fluidos geotérmicos	Se llevan a estanques de evaporación. ¹	Reinyección ²	Reinyección
Subsidencia (cm/año)	18 ² 11-17 ³	<i>Sin información</i>	<i>Sin información</i>
Sismicidad inducida	<i>Sin información</i>	No ha cambiado sustancialmente a causa de la explotación geotérmica. ³	Se han registrado microsismos de carácter tectónico, que por su ubicación no tienen relación con la explotación del campo geotérmico.
Referencias	¹ (González et al., 2015) ² (Quintero-Núñez et al., 2015) ³ (Sarychikhina et al., 2011)	¹ (Bravi et al., 2014) ² (Evans et al., 2012) ³ (Mazzoldi et al., 2015)	(Geoenergía de Guanacaste Limitada, 1997)

Las emisiones de gases no condensables (CO₂, H₂S, NH₃, y H₂) son uno de los impactos que mayor preocupación genera en las centrales geotérmicas, especialmente las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) que causan preocupación por su rol como gases de efecto invernadero (Peralta et al., 2013), y las emisiones de ácido sulfhídrico (H₂S) ya que es una gas toxico en altas concentraciones y tiene un olor desagradable aun en muy bajas concentraciones (Kristmannsdóttir et al., 2000). De las tres centrales estudiadas el campo geotérmico de Mount Amiata es el que mayores emisiones de ácido sulfhídrico y dióxido de carbono genera.

Según Barbier (2002) el ácido sulfhídrico que es el contaminante del aire de mayor preocupación en la explotación de recursos geotérmicos, sin embargo de acuerdo con este mismo autor las emisiones de azufre provenientes de centrales geotérmicas son aproximadamente la mitad de las causadas por las plantas de combustión de carbón (figura19).

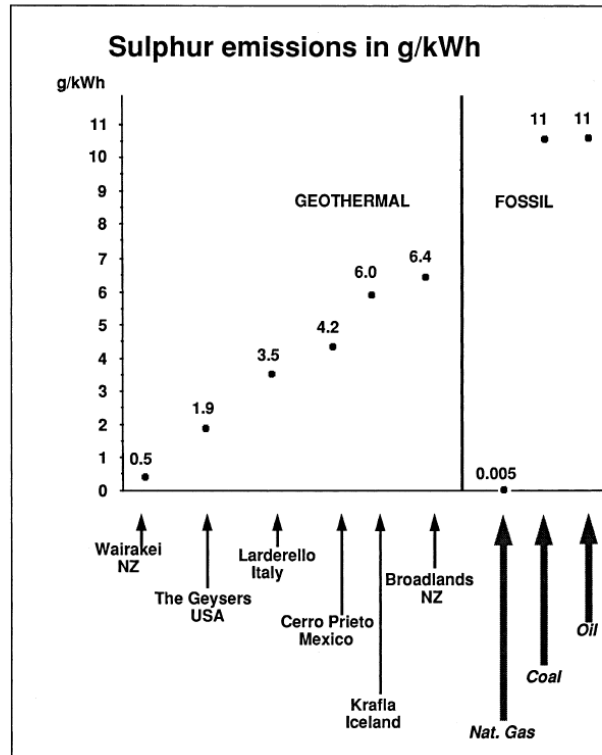


Figura 19: Comparación de las emisiones de azufre generadas por centrales geotérmicas y por combustibles fósiles (Barbier, 2002).

De acuerdo a Bertani,(2001) en los campos geotérmicos localizados en áreas volcánicas, donde las emisiones naturales de CO₂ son altas, la explotación de los recursos geotérmicos no produce emisiones adicionales. Sin embargo se ha observado que como resultado de la explotación de un campo geotérmico la concentración de H₂S incrementa relativamente más que la concentración de CO₂ (Kristmannsdóttir et al., 2003).

En Colombia la Norma de Calidad del Aire (Resolución 601 de 2006) considera el ácido sulfhídrico como una sustancia generadora de olores ofensivos, y establece sus límites permisibles, y como un contaminante no convencional para el cual establece las actividades y procesos industriales susceptibles de generarlo; sin embargo dentro de estas actividades industriales no se incluye la explotación de recursos geotérmicos.

De las tres centrales geotérmicas solo se encontraron datos de la subsidencia del terreno en Cerro Prieto (México); sin embargo, de acuerdo a Kristmannsdóttir et al. (2003) existen evidencias de subsidencia en casi todos los campos geotérmicos explotados. La mayor subsidencia reportada en un campo geotérmico es de 15 m en Wairakei, Nueva Zelanda; también se han registrado movimientos del terreno en otros campos de alta temperatura en Nueva Zelanda, Ladarello y The Geysers (Hunt, 2001).

En Mount Amiata y Miravalles se usa reinyección como método de disposición de los fluidos residuales mientras que en Cerro Prieto se utilizan lagunas de evaporación. De acuerdo a Hunt (2001) la disposición en superficie causa mayores problemas ambientales que la reinyección, ya que las consecuencias negativas no solo están relacionadas con el volumen de fluidos a disponer, sino también con la relativa alta temperatura y toxicidad que pueden presentar. La reinyección de los fluidos gastados es el método más efectivo para combatir la contaminación de las aguas (Kristmannsdóttir et al., 2003); además también puede ayudar a mantener la presión del reservorio, para extraer calor adicional de las rocas y prolongar la vida útil del reservorio (Barbier, 2002).

La mayoría de los sistemas geotérmicos de alta temperatura se encuentran en regiones tectónicamente activas donde hay altos niveles de estrés en la parte superior de la corteza terrestre; este estrés se manifiesta por fallamiento activo y numerosos terremotos (Hunt, 2001). En los tres casos estudiados no existen evidencias claras que relacionen los eventos sísmicos con la explotación geotérmica; sin embargo estudios en varios campos geotérmicos de alta temperatura han mostrado que la explotación puede resultar en un incremento en el número de sismos de pequeña magnitud o microsismos (Hunt, 2001).

Existen otras consecuencias ambientales de las explotaciones geotérmicas, como cambios en la temperatura del subsuelo, disminución del nivel del agua subterránea y degradación de las características térmicas (Hunt, 2001), que además de causar impactos en el ambiente, también pueden afectar la sustentabilidad del reservorio.

Los impactos ambientales analizados en las tres centrales geotérmicas son impactos medidos en la etapa de operación de la planta, sin embargo durante las etapas previas a la operación también se generan impactos. Actividades como remoción de coberturas vegetales, construcción y/o adecuación de vías de acceso, transporte de maquinaria, perforación de pozos, construcción de infraestructura, entre otras, producen cambios en el ambiente, especialmente cuando se intervienen ecosistemas naturales.

La zona noroccidental del Volcán nevado del Ruiz es un área rural perteneciente al municipio de Villamaría, ubicada a aproximadamente 20 km de la ciudad de Manizales. Es un área que ya ha sido intervenida, en la que predominan pastos y potreros para ganadería, y donde hay poca población asentada. Estas características constituyen una ventaja para la eventual construcción de una central geotérmica, ya que no implicaría la intervención de un ecosistema natural, reduciendo la magnitud de los impactos que se puedan generar. Por otra parte, esta zona se encuentra alejada del sistema de transmisión nacional

eléctrico, en consecuencia se requeriría construir la infraestructura necesaria para conectar la central con el sistema interconectado nacional. Este proceso generaría algunos impactos ambientales que también es necesario considerar.

5.7 Marco Normativo Colombiano aplicable al aprovechamiento de recursos geotérmicos.

El Código nacional de recursos renovables y de protección al medio ambiente (Decreto 28 11 de 1974) define los recursos geotérmicos en sus artículos 172 y 173, además establece que la Nación se reserva el dominio de los recursos geotérmicos (artículo 174) y enumera algunos de los usos que pueden tener estos recursos, dentro de los que se incluye la producción de energía.

Dado que los recursos geotérmicos son un recurso natural renovable y que la explotación de los mismos puede producir su deterioro o introducir modificaciones en el ambiente, su aprovechamiento requiere de una licencia ambiental. Las licencias ambientales fueron definidas en la ley 99 de 1993 y posteriormente reglamentadas por el decreto 2041 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que define la competencia y exigibilidad de la licencia ambiental. Para el sector eléctrico el artículo 8 de este decreto define que la construcción y operación de centrales generadoras de energía eléctrica con capacidad instalada superior a 100 MW requieren licencia ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

La ley de Uso Racional de Energía URE (ley 697 de 2001) define los recursos geotérmicos como una fuente no convencional de energía, y crea el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROURE) a cargo del Ministerio de Minas y Energía. Posteriormente en 2003 esta ley es reglamentada por el decreto 3683 de 2003 y se crea la Comisión Intersectorial para el Uso Racional y Eficiente de la energía y Fuertes No Convencionales de energía (CIURE), con el fin de asesor y apoyar al Ministerio de Minas y Energía en la coordinación de políticas sobre el uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales en el sistema interconectado nacional y en las zonas no interconectadas.

A través de la resolución 180919 de 2010, el Ministerio de Minas y Energía adopta el Plan de Acción Indicativo 2010 – 2015 para desarrollar el PROURE. Este plan incluye un sub-

programa para la promoción del uso de fuentes no convencionales de energía, el cual busca promover los usos y la participación de éstas en la canasta energética nacional. En el marco de la legislación anterior la unidad de planeación minero energética (UPME) formuló un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía (PDFNCE) en 2010, en el cual se describe el potencial geotérmico nacional.

Recientemente el gobierno colombiano ha hecho esfuerzos para reforzar el marco legal del desarrollo de fuentes no convencionales de energía (Alfaro, 2015): en el año 2013 se aprobó la ley 1665 por la cual se establece el estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) y en el 2014 se aprobó la ley 1715 por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

Específicamente para el aprovechamiento de recursos geotérmicos, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible junto con la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, se encuentran en proceso de expedir una resolución para adoptar los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental, requerido para el trámite de la licencia ambiental de proyectos de exploración y uso de fuentes de energía geotérmica.

También existen otras normas que definen los incentivos tributarios para el desarrollo de fuentes no convencionales de generación de energía, que podrían aplicarse al aprovechamiento de recursos geotérmicos: excepción de IVA para proyectos que sean exportadores de certificados de reducción de emisiones de carbono y que contribuyan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (artículo 428-i del estatuto tributario); exclusión de IVA para los equipos de control y monitoreo ambiental (artículo 424-7 del estatuto tributario); deducción de renta del 125% de valor invertido en proyectos calificados como de carácter científico, tecnológico o de innovación por el consejo nacional de ciencia y tecnología (artículo 12 de la ley 633 de 2000).

6 Conclusiones

El cálculo de la temperatura a profundidad a lo largo del perfil B permitió identificar que la capa de flujos andesíticos sobre el complejo de Cajamarca produce un aumento mucho mayor en la temperatura a profundidad, que en las otras áreas del perfil.

La estimación de potencial geotérmico depende, además de las propiedades térmicas de las rocas, del volumen del reservorio y del factor de recuperación. En consecuencia una mejor estimación del potencial geotérmico del complejo volcánico del Ruiz requiere futuras investigaciones que permitan obtener una mejor estimación de estas dos variables.

De acuerdo con el modelo y los análisis propuestos el potencial geotérmico estimado para el área de 0,5 km² es de 34 MW, este valor es coherente con otras estimaciones del potencial geotérmico del macizo volcánico del Ruiz realizadas por Mejía et al. (2014) y Battocletti et al. (1999) quienes estimaron el potencial en 50 MW, aunque estos autores no describen la metodología empleada para estimar dicho valor. Al contrario, este trabajo presenta todas las etapas de cálculo que permiten cuantificar el potencial geotérmico explotable.

Westaway et al. (2013) describen el procedimiento para realizar una corrección por topografía en valles o topografías similares, debido a que estas variaciones afectan el flujo de calor: Por lo tanto en estudios futuros en el área del Volcán Nevado de Ruiz se recomienda realizar una corrección por topografía para obtener una mejor estimación de la temperatura a profundidad.

Es evidente que aunque la geotermia causa menos impactos ambientales que otras formas de generación de energía, la explotación de estos recursos, especialmente los sistemas de alta temperatura, no deja de ser una actividad que causa modificaciones en el ambiente y que requiere medidas de prevención, mitigación y compensación de las afectaciones causadas. Para el caso de la zona norte y noroccidental del Nevado de Ruiz la implementación de estas medidas frente a una eventual explotación geotérmica, es un aspecto clave, debido a su proximidad al Parque Nacional Natural los Nevados, que es un área de gran fragilidad ambiental.

Los impactos ambientales que puede generar la explotación de los recursos geotérmicos dependen de las características específicas de cada campo geotérmico y del método de

explotación de los recursos, en consecuencia una metodología de prevención, mitigación y control de estos impactos requiere del conocimiento preciso de las variables ambientales y sociales del área, y de las especificaciones técnicas del método de explotación, que permita identificar las particularidades del campo y definir medidas de gestión que se adapten a estas.

De acuerdo con la legislación colombiana, los recursos geotérmicos del país se pueden explotar cumpliendo con la normatividad que regula el aprovechamiento de los recursos renovables. A partir del año 2014 con la aprobación de la ley 1715, la energía generada a partir de los recursos geotérmicos podría integrarse al sistema interconectado nacional. Sin embargo, para el caso del Volcán Nevado del Ruiz no existe la infraestructura necesaria para la conexión al sistema interconectado nacional, por lo tanto un aprovechamiento geotérmico en esta área podría usarse para suplir las necesidades energéticas locales o requeriría de la construcción de la infraestructura necesaria para la interconexión.

Modelos geológicos 3D (González-García et al., 2015) construidos a partir de los distintos trabajos de interpretación geofísica (Rojas Sarmiento, 2012; Almaguer, 2013) y futuro pozos exploratorios profundos (Alfaro, 2015) permitirán refinar los perfiles geológicos inferidos presentados en este trabajo. En consecuencia, la estimación del potencial geotérmico sería más precisa, ya que estaría apoyada en una mayor cantidad de datos de campo, que contribuirían a identificar con mayor precisión la ubicación del contacto entre los flujos andesíticos y el complejo Cajamarca, que juega un rol fundamental en el valor del potencial geotérmico estimado.

7 Recomendaciones

La estimación de la capacidad calorífica con la sonda KD2 Pro y el sensor RK- 1 requiere que las muestras sean de un tamaño suficientemente grande para realizar una perforación de 6 cm de longitud y 4 mm de diámetro sobre una superficie plana sin que la muestra se fracture. No se recomienda tomar muestras de roca que se encuentren meteorizadas o muy fracturadas, ya que es muy probable que no resistan la perforación y que no sea posible realizar el análisis de conductividad térmica o se generen errores en el mismo.

El método de análisis de la conductividad térmica en rocas fracturadas requiere de mayor manipulación de las muestras y de la estimación del porcentaje de saturación y porosidad de la mezcla realizada (roca pulverizada y agua). En este proceso se pueden cometer errores que conduzcan a obtener datos sesgados de conductividad. Cuando se realice este tipo de análisis se recomienda hacerlo también en una muestra sólida para tener un valor de referencia que permita evaluar la confianza del método.

La estimación de la capacidad calorífica se realizó de acuerdo con el tipo de roca y a algunas características específicas de cada muestra, sin embargo la composición mineralógica y las características físicas de las rocas son variables. Por lo tanto, para obtener un dato más preciso de esta propiedad se recomienda calcularla con base en el calor específico de cada uno de sus componentes, a través de una sección delgada, que permita identificar los minerales que componen cada muestra y su proporción, o de otros métodos para determinar la capacidad calorífica, como el uso de calorímetros o de equipos especializados como *C-THERM*, el cual utiliza la técnica modificada de fuente plana para determinar propiedades térmicas de diferentes materiales.

En una etapa sucesiva a este trabajo sería interesante construir un modelo numérico para simular y predecir la transferencia de calor en el reservorio en condiciones naturales y bajo su posible explotación, teniendo en cuenta la influencia de las fallas y utilizando la temperatura medida en las fuentes termales para calibrar el modelo.

8 Bibliografía

- Akinyemi, O. D., Onifade, Y. S., Badmus, B. S., & Awokola, O. S. (2012). Determination of Thermal Properties of Rock Samples Using Modified Thermal Block Method. *Earth Science India*, 5, 13.
- Alfaro, C. (2015, April). *Improvement of Perception of the Geothermal Energy as a Potential Source of Electrical Energy in Colombia, Country Update*. Paper presented at the World Geothermal Congress, Melbourne, Australia.
- Alfaro, C., Bernal, N., Ramírez, G., & Escovar, R. (2000, May 28 - June 10). *Colombia, Country Update*. Paper presented at the Proceedings World Geothermal Congress Kyushu - Tohoku, Japan.
- Almaguer, J. L. (2013). *Estudios Magnetotérmico con fines de interés Geotérmico en sector Norte del Nevado del Ruiz, Colombia* (Maestro en Ciencias de la Tierra), Universidad Nacional Autónoma de México.
- American Society for Testing and Materials. (2008). Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure (Vol. D5334 – 08, pp. 9): American Society for Testing and Materials.
- Andolfsson, T. (2013). *Analyses of thermal conductivity from mineral composition and analyses by use of Thermal Conductivity Scanner: A study of thermal properties in Scanian rock types*. Lund University.
- Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2), 3-65. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3)
- Barón, A. (2003). Modelos geoespaciales de la distribución de las variables climatológicas en el territorio colombiano. *Meteorología Colombiana*, 7, 9.
- Batini, F., Console, R., & Luongo, G. (1985). Seismological study of Larderello — Travale geothermal area. *Geothermics*, 14(2–3), 255-272. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-6505\(85\)90066-5](http://dx.doi.org/10.1016/0375-6505(85)90066-5)
- Battocletti, L., & Lawrence, B. (1999). Geothermal Resources in Latin America & the Caribbean (pp. 214): Sandia National Laboratories and U.S Department of Energy, Office of geothermal Technologies.
- Bertani, R. (2001). IGA Activities. Highlight of the 28th IGA Board Meeting. *IGA Quarterly No. 44*, 16.
- Bravi, M., & Basosi, R. (2014). Environmental impact of electricity from selected geothermal power plants in Italy. *Journal of Cleaner Production*, 66(0), 301-308. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.015>

- Brown, P. H., Tullos, D., Tilt, B., Magee, D., & Wolf, A. T. (2009). Modeling the costs and benefits of dam construction from a multidisciplinary perspective. *Journal of Environmental Management*, 90, Supplement 3, S303-S311. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.025>
- Calcagno, P., Baujard, C., Guillou-Frottier, L., Dagallier, A., & Genter, A. (2014). Estimation of the deep geothermal potential within the Tertiary Limagne basin (French Massif Central): An integrated 3D geological and thermal approach. *Geothermics*, 51(0), 496-508. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.02.002>
- Central Hidroeléctrica de Caldas. (2013). Informe de presentación al Mercado Reasegurador (pp. 46): CHEC - Grupo EPM.
- Central Hidroeléctrica de Caldas, Instituto Colombiano de Energía Eléctrica, Consultoría Técnica Colombiana Ltda, & Geotérmica Italiana. (1983). *Investigacion Geotérmica Macizo Volcánico del Ruiz. Fase II, Etapa A* (Vol. II, III). Bogotá.
- Clauser, C. (2006). Geothermal Energy. In K. Heinloth (Ed.), *Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies, Vol. 3: Energy Technologies, Subvol. C: Renewable Energies* (pp. 115): Springer Verlag, Heidelberg-Berlin.
- Clauser, C. (2011). Thermal storage and transport properties of rocks II : thermal conductivity and diffusivity. In H. K. Gupta (Ed.), *Encyclopedia of solid earth geophysics* (Vol. 2, pp. 1431-1448).
- Clauser, C., & Huenges, E. (1995). Thermal conductivity of rocks and minerals. In T. J. Ahrens (Ed.), *Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants* (Vol. 3, pp. 105-126). Washington, DC: American Geophysical Union. AGU.
- CORPOEMA, C. E. (2010). Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE) (pp. 382). Bogotá: Unidad de planeación minero energética, UPME.
- Decagon Devices Inc. (2008). KD2 Pro Thermal Properties Analyzer *Operator's Manual Version 12* (pp. 72): Decagon Devices, Inc.
- Espinoza, O., & Santoyo, E. (2011). Evaluación del régimen térmico del subsuelo y sus implicaciones en el análisis y explotación de los sistemas geoenergéticos (pozos geotérmicos, petroleros y permafrost). *GEOS*, 31, 15.
- Evans, K. F., Zappone, A., Kraft, T., Deichmann, N., & Moia, F. (2012). A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. *Geothermics*, 41, 30-54. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.08.002>
- Forero, J. A. (2012). *Caracterización de las alteraciones hidrotermales en el flanco Noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia*. (Magister en Geología), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.

- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). Heat Flow Analysis for Unsaturated Soils. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. (pp. 944): John Wiley & Sons.
- Geoenergía de Guanacaste Limitada. (1997). Informe de impactos ambientales y sociales proyecto geotérmico Miravalles III.
- Glassley, W. E. (2014). Introduction *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment* (pp. 9). Boca Raton, FL: CRC Press.
- González-García, J., Hauser, J., Annetts, D., Franco, J., Vallejo, E., & Regenauer-Lieb, K. (2015, April). *Nevado Del Ruiz Volcano (Colombia): A 3D Model Combining Geological and Geophysical Information*. Paper presented at the World Geothermal Congress, Melbourne, Australia.
- González, H. (2001). *Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz*. Bogotá, D.C: Instituto de investigación e información geocientífica, minero-ambiental y nuclear. INGEOMINAS.
- González, Z., González, D., & Kretschmar, T. (2015, April). *First Approach of Environmental Impact Assessment of Cerro Prieto Geothermal Power Plant, BC Mexico*. Paper presented at the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Hunt, T. (2001). Five lectures on environmental effects of geothermal utilization (pp. 110). Reykjavík, Iceland: United Nations University, Geothermal Training Programme.
- Hurter, S., & Schellschmidt, R. (2003). Atlas of geothermal resources in Europe. *Geothermics*, 32(4–6), 779-787. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00070-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00070-1)
- Idaho National Laboratory. (2006). Environmental Impacts, Attributes, and Feasibility Criteria. In U. S. D. o. Energy (Ed.), *The Future of Geothermal Energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (Egs) on the United States in the 21st Century: An Assessment* (pp. 19). Idaho Falls: MIT Press (MA).
- INGEOMINAS, & Ministerio de minas y energía. (2000). Mapa Geotérmico de Colombia Versión 1.0 Escala 1:1'500.000 *Memoria Explicativa*. Bogotá D.C.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. Volcán Nevado del Ruíz. Retrieved 03/08/, 2015, from <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/volcan-nevado-ruiz>
- IPPC. (2012). Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (pp. 232): Intergovernmental Panel on Climate Change.
- ISAGEN. (2012). Notas para la investigación y desarrollo de proyectos geotérmicos en Colombia. In B. I. d. D. BID (Ed.), (pp. 78).
- Kagel, A., Bates, D., & Gawell, K. (2007). A Guide to Geothermal Energy and the Environment (pp. 86). Washington, D.C.: Geothermal Energy Association

- Kristmannsdóttir, H., & Ármannsson, H. (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics*, 32(4–6), 451-461. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00052-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00052-X)
- Kristmannsdóttir, H., Sigurgeirsson, M., Ármannsson, H., Hjartarson, H., & Ólafsson, M. (2000). Sulfur gas emissions from geothermal power plants in Iceland. *Geothermics*, 29(4–5), 525-538. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505\(00\)00020-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505(00)00020-1)
- Kumar, D., & Katoch, S. S. (2015). Sustainability suspense of small hydropower projects: A study from western Himalayan region of India. *Renewable Energy*, 76, 220-233. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.025>
- Londoño, J. M., & Sudo, Y. (2003). Velocity structure and a seismic model for Nevado del Ruiz Volcano (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119(1–4), 61-87. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00306-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00306-2)
- Mazzoldi, A., Borgia, A., Ripepe, M., Marchetti, E., Olivieri, G., Schiava, M. d., & Allocca, C. (2015). Faults strengthening and seismicity induced by geothermal exploitation on a spreading volcano, Mt. Amiata, Italia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 159-168. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.015>
- Mejía, E. (2012). *Características Cinemáticas y Condiciones de Deformación de un Segmento de la Falla Palestina al NE del Volcán Nevado del Ruiz*. (Magister en Ciencias-Geología), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Mejía, E., Rayo, L., Méndez, J., & Echeverri, J. (2014, March 23-29). *Geothermal Development in Colombia* Paper presented at the Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization, Santa Tecla, El Salvador.
- Mejía, E., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J. A., & Cramer, T. (2012). Análisis estructural al noreste del Volcán Nevado de Ruiz Colombia – Aporte a la Exploración Geotérmica. *Boletín de Geología*, 34(1), 15.
- Mejía, N. R. (2013). *Metodología adaptada para valoración del Impacto Ambiental Potencial Ocasionado por el Aprovechamiento de Energía Geotérmica Sobre el Complejo “Parque Natural Nacional de Los Nevados (P.N.N. Los Nevados) y su Zona de Amortiguación” en las Áreas de Influencia de los Departamentos de Caldas y Risaralda.*, Universidad de Manizales, Manizales.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). Resolución Número (601) (pp. 13). Bogotá, D.C.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Decreto 2041 (pp. 51). Bogota, D.C.
- Ministerio de Cultura, & Federación Nacional de cafeteros. (2009). *Plan de Manejo Paisaje Cultural Cafetero*. Bogotá.

- Monsalve, M. L., Rodriguez, G. I., Mendez, R. A., & Bernal, N. F. (1998). Geology of the Well Nereidas 1, Nevado Del Ruiz Volcano, Colombia *Geothermal Resources Council* (Vol. 22, pp. 6).
- Mosquera, D., Marín, P., Vesga, C., & González, H. (Cartographer). (1998a). Geología de la Plancha 225 Nevado del Ruíz.
- Mosquera, D., Marín, P., Vesga, C., González, H., & Maya, M. (Cartographer). (1998b). Geología de la Plancha 206 Manizales.
- Peralta, O., Castro, T., Durón, M., Salcido, A., Celada-Murillo, A.-T., Navarro-González, R., Márquez, C., García, J., de la Rosa, J., Torres, R., Villegas-Martínez, R., Carreón-Sierra, S., Imaz, M., Martínez-Arroyo, A., Saavedra, I., Espinosa, M. d. I. L., & Torres-Jaramillo, A. (2013). H₂S emissions from Cerro Prieto geothermal power plant, Mexico, and air pollutants measurements in the area. *Geothermics*, 46, 55-65. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.12.001>
- Quintero-Núñez, M., Cuaya-Simbro, M. E., Canales-Rodriguez, M. A., Garcia-Cueto, O. R., Santillán-Soto, N., Ojeda- Benítez, S., & Velázquez-Limón, N. (2015, April). *A Comparative Study on the Environmental Impacts of a Binational Geothermal System: Imperial Valley, CA., U.S.A. and Cerro Prieto, Mexicali Valley, BC, México*. Paper presented at the World Geothermal Congress, Melbourne, Australia.
- Rayo, L. (2012). *Evolución Geoquímica y Térmica del Volcán Nevado del Ruíz, Colombia*. (Magister en Ciencias-Geología), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, Colombia.
- República de Colombia. Estatuto tributario nacional.
- República de Colombia. (2000). Ley 633. Bogotá, D.C.
- República de Colombia. (2001). Ley 697. Bogota, D.C.
- Rojas, O. E. (2012). *Contribución al modelo geotérmico asociado al sistema volcánico Nevado del Ruiz-Colombia, por medio del análisis de la relación entre la susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica y térmica del sistema*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá
- Rybach, L. (2003). Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32(4-6), 463-470. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00057-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00057-9)
- Sarychikhina, O., Glowacka, E., Mellors, R., & Vidal, F. S. (2011). Land subsidence in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, from 1994 to 2005: An integrated analysis of DInSAR, leveling and geological data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 204(1-4), 76-90. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.03.004>
- Siciliano, G., Urban, F., Kim, S., & Dara Lonn, P. (2015). Hydropower, social priorities and the rural-urban development divide: The case of large dams in Cambodia. *Energy Policy*, 86, 273-285. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.009>

- U.S. Energy Information Administration, E. (2014). Colombia Overview: U.S. Energy Information Administration.
- UNESCO. (2012). Decisions report – 36th session of the World Heritage Committee (pp. 245). Saint Petersburg: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- van Manen, S. M., & Wallin, E. (2012). Ground temperature profiles and thermal rock properties at Wairakei, New Zealand. *Renewable Energy*, 43, 313-321. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.032>
- Walsh, W. (2013). Geothermal resource assessment of the Clarke Lake Gas Field, Fort Nelson, British Columbia. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 61(3), 241-251.
- Waples, D., & Waples, J. (2004). A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 1: Minerals and Nonporous Rocks. *Natural Resources Research*, 13(2), 97-122. doi: 10.1023/B:NARR.0000032647.41046.e7
- Westaway, R., & Younger, P. L. (2013). Accounting for palaeoclimate and topography: A rigorous approach to correction of the British geothermal dataset. *Geothermics*, 48, 31-51. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.03.009>
- Zang, A., Oye, V., Jousset, P., Deichmann, N., Gritto, R., McGarr, A., Majer, E., Bruhn, D. (2014). Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs – An overview. *Analysis of Induced Seismicity in Geothermal Operations*, 52, 6-21. doi: <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.06.005>