

Relación entre temperaturas de banda térmica en imágenes satelitales y estudios geoquímicos

Elsa Juliana Vega Salazar

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica
Manizales, 2019

Relación entre temperaturas de banda térmica en imágenes satelitales y estudios geoquímicos

Elsa Juliana Vega Salazar

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Tecnologías de la Información Geográfica

Director:

Ph.D., **Mario Giraldo Fadul**

Codirector:

Ph.D. P.E., **Warren T. Dewhurst**

Línea de Investigación:

Geomática

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica

Manizales, 2019

Agradecimientos y Dedicatoria

Agradezco al Dr. Mario Giraldo por su ayuda y guía para el desarrollo de este proyecto; al Grupo Dewhurst SAS, por su apoyo económico y al Dr. Warren T. Dewhurst por su apoyo técnico.

A la Universidad de Manizales, y a cada docente que aportaron su conocimiento y experiencia.

Dedico este trabajo a mis padres Samira y Omar, a mi hermanita Laura, gracias a su apoyo incondicional y a su ejemplo de honestidad, trabajo y amor he podido cumplir con mis metas.

A la memoria de mi abuela María, mujer que nos demostró la valentía y amor incondicional.

Resumen

La banda térmica de las imágenes de satélite sirve como apoyo en la evaluación del potencial geotérmico de zonas poco estudiadas. Este estudio correlaciona las temperaturas calculadas a partir de bandas térmicas de imágenes del satélite Landsat con las obtenidas en estudios geoquímicos para un transecto en la zona norte del Complejo Volcánico del Volcán Nevado del Ruiz hasta la región de Santa Rosa de Cabal (Risaralda, Colombia).

Los análisis estadísticos mostraron relaciones tanto positivas como negativas, donde la principal correlación encontrada fue la correlación positiva muy baja, donde los valores oscilaron entre -0.8669 y 0.7025, representado por los manantiales Botalón y Agua Blanca, respectivamente. No se hallaron correlaciones perfectas. Se hallaron temperaturas entre -143°C y 70°C. Se identificaron tres zonas de interés geotérmicos San Vicente- Santa Rosa, Botero Londoño- Chorro Negro, Chorro Negro – Botalón.

Los resultados obtenidos sugieren que las imágenes satelitales con banda térmica son un apoyo eficiente a los estudios superficiales de geología, geoquímica y geofísica para estimar el potencial geotérmico de una fuente.

Palabras clave: Geoquímica, Imágenes satelitales Landsat, banda termal, correlación, temperatura, geotermia.

Abstract

The thermal band of the satellite images serves as a support in the evaluation of the geothermal potential of limited studied areas. This study correlates the temperatures calculated from thermal bands of Landsat satellite images with those obtained in geochemical studies for a zone in the northern zone of the Nevado del Ruiz volcanic complex to the Santa Rosa de Cabal zone (Risaralda, Colombia).

The statistical analyzes showed both positive and negative relationships, where the main correlation found was the very low positive correlation, where the values oscillated between -0.8669 and 0.7025, represented by the Botalón and Agua Blanca springs, respectively. No perfect correlations were found. Temperatures between -143° C and 70° C were found. Three geothermal interest zones were identified: San Vicente - Santa Rosa, Botero Londoño - Chorro Negro, Chorro Negro - Botalón.

The results obtained suggest that satellite images with the thermal band are efficient support to surface studies of geology, geochemistry, and geophysics to estimate the geothermal potential of a source.

Key words: Geochemistry, Landsat satellite images, thermal band, correlation, temperature, geothermal.

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación	3
1.1 Descripción del área problemática.....	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.3 Justificación	5
2. Antecedentes	6
3. Objetivos	9
3.1 Objetivo general.....	9
3.2 Objetivos específicos	9
4. Referente Contextual	11
5. Referente Normativo y legal.....	13
6. Referente teórico	17
6.1 Energía Geotérmica.....	17
6.2 Imágenes satelitales	24
6.3 Procesamiento Estadístico.....	31
6.4 Métodos de interpolación	31
7. Hipótesis de investigación	33
8. Metodología.....	35
8.1 Enfoque metodológico	35
8.2 Tipo de estudio	35
8.3 Diseño de la investigación	35
8.4 Población o unidad de trabajo.....	35
8.5 Muestra y muestreo	35
8.6 Operacionalización de variables	35
8.7 Técnicas e instrumentos de recolección de información	36
8.8 Plan de análisis.....	36
8.8.1 Fase 1. Determinación de las temperaturas con imágenes Landsat con la banda termal correspondientes a los estudios previos seleccionados.....	36
8.8.2 Fase 2. Compilación de información de estudios de campo de temperatura para la zona de estudio.....	39
8.8.3 Fase 3. Correlación las temperaturas de estudios geoquímicos con las temperaturas calculadas con la banda termal y evaluar su nivel de concordancia....	40
8.8.4 Fase 4. Identificación con base en la información térmica áreas en las imágenes de satélite con potencial para estudios geotérmicos en el área de estudio.	41
9. Resultados	43
10. Conclusiones	55

11. Recomendaciones.....	56
Referencias bibliográficas	63

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Estado actual de los proyectos geotérmico en Colombia	11
Figura 2. Área de estudio y localización de pozo Nereidas 1	12
Figura 3. Fases de un proyecto geotérmico, riesgo y costo acumulativo ,	19
Figura 4. Diagrama Lindal	23
Figura 5. Localización manantiales Complejo Volcánico Cerro Bravo- Cerro Machín.....	24
Figura 6. Diagrama de flujo pre-procesamiento de imágenes.	28
Figura 7. Valores de coeficiente de correlación	31
Figura 8. Correlaciones encontradas en los manantiales considerados	43
Figura 9. Zona de mayor correlación 2008	47
Figura 10. Zona de mayor correlación 2009	48
Figura 11. Zona de mayor correlación 2011	48
Figura 12. Kriging vs IDW	49
Figura 13. Zona de interés San Vicente - Santa Rosa – Interpolación	50
Figura 14. Manantiales zona de interes San Vicente - Santa Rosa	50
Figura 15. Zona de Interés Botero-Londoño- Chorro Negro	51
Figura 16. Localización manantiales zona de interés Botero Londoño - Chorro Negro....	52
Figura 17. Zona de Interés Chorro Negro – Botalón.....	53
Figura 18. Localización manantiales zona de interés Chorro Negro - Botalón.....	53

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparación de aspectos legales sobre geotermia en siete países.....	14
Tabla 2. Costos promedio de desarrollo por fases	20
Tabla 3. Características de imágenes Landsat	26
Tabla 4. Manantiales dentro del área de estudio	37
Tabla 5. Valores para cálculo de radianza.	39
Tabla 6. Valores de K1 y K2	39
Tabla 7. Valores de correlación de Pearson	40
Tabla 8. Cantidad de imágenes consideradas en el proceso	43
Tabla 9. Resumen cálculo de temperaturas	44

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviatura	Término
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
LiDAR	Light Detection and Ranging
VNR	Volcán Nevado del Ruiz
CHEC	Central Hidroeléctrica de Caldas – Grupo EPM
TIR	Thermal Infrared
TM	Thematic Mapper
KRV	Valle del Rift de Kenia
ETM	Enhanced Thematic Mapper
MW	Megawatt
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
GDF	Fondo de Desarrollo Geotérmico
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovables
HDR	Hot Dry Rock
EGS	Enhanced Geothermal System
CVCBCM	Complejo Volcánico Cerro Bravo- Cerro Machin
YNP	Yellowstone Parque Nacional

Introducción

La energía geotérmica se considera como una forma de energía renovable, que, por medio del calor del interior de la tierra, se puede generar energía eléctrica de manera confiable, limpia y sostenida. Actualmente, Colombia no tiene plantas eléctricas, generadoras de energía a base de geotermia, sin embargo, en el territorio nacional desde los años 80's se han realizado estudios exploratorios para identificar zonas con potencial geotérmico.

Dentro de los estudios exploratorios comúnmente se incluye geoquímica, geología, geofísica, que brindan información relevante como composición química, temperatura, morfología preliminar. También es común el uso de sensores remotos, como los son imágenes satelitales como apoyo a la exploración de superficie. El objetivo principal es relacionar temperaturas calculadas a partir de las bandas térmicas de imágenes satelitales y estudios geoquímicos. Donde las principales limitaciones se encuentran la disponibilidad de estudios geoquímicos y obtención de imágenes para el sector en particular.

La metodología de investigación tiene un enfoque cuantitativo de tipo correlacional cuyo diseño es no experimental – transversal. Para el campo de la geotermia la implementación de esta metodología ayudaría al estudio de los prospectos geotérmicos en cualquier parte del mundo. Como hipótesis principal es considerada que las temperaturas de banda térmica, calculadas a partir de imágenes satelitales, se pueden relacionar con las obtenidas en estudios geoquímicos de la misma zona, mediante una estrategia metodológica que arroje información pertinente, confiable y útil para la toma de decisiones frente a procesos de exploración geotérmica.

La exploración geotérmica generalmente es costosa y riesgosa para el desarrollador, al crear metodologías que permitan reducir costos y agilizar un poco el conocimiento geocientífico de una región, ayudaría al desarrollo geotérmico de las regiones, ayudando al medio ambiente ya que es una forma de energía limpia, confiable y sostenida, ya que el funcionamiento de una planta geotérmica es 24 horas 365 días al año, independientemente de las condiciones ambientales, por ejemplo, fenómeno de El Niño.

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

1.1 Descripción del área problemática

La geotermia es una forma de generación energética viable mundialmente reconocida, pero no implementada, en Colombia. En la Cordillera Central Colombiana, se han realizado estudios de exploración geotérmica superficial, incluyendo campañas geoquímicas, geofísicas y geológicas para evaluar este recurso en el subsuelo.

Los estudios típicos para realizar un modelo geotérmico conceptual abarcan diferentes áreas del conocimiento, como geología, geoquímica y geofísica, que corresponden a los estudios exploratorios superficiales.

De acuerdo con Ochieng (2013), la energía geotérmica comúnmente se manifiesta en superficie en forma de fumarolas, aguas termales, géiseres, terrenos humeantes y terrenos con alteración; señala además que, las aplicaciones de detección remota en la exploración geotérmica dependen de las propiedades espectrales y espaciales de las plataformas como LIDAR (*Light Detection and Ranging*) y ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*).

En Etiopía a pesar del conocimiento del alto potencial geotérmico, Mengistu et al. (2019), utilizaron imágenes satelitales Landsat 8, e infrarrojas termales (TIR), De donde los métodos de detección remota TIR demostraron ser una técnica rentable para detectar anomalías en el área de interés. Para la zona de Moye (área de interés), las temperaturas de superficie máxima y mínima halladas fueron de 315.8 K (42.65°C) y 292.2 K (19.05°C). Las áreas geotérmicas identificadas se determinaron con el análisis del mecanismo geotérmico y la investigación geológica regional, de donde los resultados demuestran que la distribución de las áreas geotérmicas se correlacionan estrechamente con el desarrollo de estructuras con fallas en el área de estudio. Los resultados demostraron que la detección remota TIR es un método eficaz, preciso y apropiado para la exploración geotérmica. La metodología aplicada en este estudio redujo de manera eficiente los costos, tiempo y recursos en el compromiso de exploración geotérmica y ha localizado sitios geotérmicos prometedores utilizando sensores remotos para una mayor exploración en el área de Moye.

Según Savage (2009), el Yellowstone National Park (YNP) contiene la mayor concentración mundial de características geotérmicas, donde uno de los componentes del monitoreo es la teledetección, De donde las imágenes Landsat se convirtió en la única fuente de imágenes infrarroja térmica disponible para el análisis histórico y de monitoreo a largo plazo de área geotérmicas en el YNP, estas imágenes se emplearon como una herramienta para el mapeo del flujo del calor geotérmico y las áreas geotérmicamente activas en el YNP. Las

estimaciones de flujo de calor geotérmico fueron inexactas debido a las limitaciones inherentes de los datos del Landsat combinados con las complejidades que surgen de los efectos de la radiación solar y la variación espacial y temporal de la vegetación, microorganismos, salidas de vapor, sin embargo, la emisión terrestre se estimó con resultados aceptables. De donde el análisis de cambios mostró una relación entre la diferencia absoluta en la emisión terrestre y los enjambres sísmicos con el 34% de la variación explicada.

Negroho y Dirgahayu (2015), el potencial geotérmico en el monte Ungaran (Indonesia) en el cual la tecnología de detección remota puede desempeñar un papel en la actividad de exploración geotérmica para mapear la distribución de las temperaturas de la superficie terrestre asociada con las manifestaciones geotérmicas. El objetivo del estudio fue obtener la distribución de la temperatura superficial como un análisis regional del potencial geotérmico; el método empleado fue una correlación de la temperatura de brillo Landsat 8 con la temperatura de la superficie terrestre, donde la correlación de R^2 fue igual a 0.87, lo cual muestra una correlación alta. La temperatura de la superficie del terreno Landsat 8 no se puede usar directamente para identificar el potencial geotérmico, especialmente en el área de vegetación densa, ya que esta puede absorber la energía térmica liberada por la superficie geotérmica.

Blanco-Arrué et al (sin fecha), caracterizaron la región BíoBío (zona central de Chile) zonas propicias para la extracción geotérmica, usando imágenes Landsat 7 +ETM y basándose en la información geológica y geoquímica. Realizando la conversión de los niveles digitales (ND) a reflectancia, además realizaron corrección topográfica, obteniendo las firmas espectrales características de los minerales que se encuentran en las zonas termales, interpretando los datos obtenidos identificaron las zonas de interés.

En países, como Taiwán, Kenia, Indonesia, Chile, se han adelantado trabajos que implican la correlación de datos de campo, con sensores remotos (imágenes satelitales y banda térmica). En Colombia, en el municipio de Santa Rosa de Cabal (Risaralda), y el Volcán Nevado del Ruiz (VNR), incluyendo sus zonas aledañas, se han realizado estudios de exploración geotérmica. Sin embargo, hasta el presente no se tiene una correlación de información suministrada por imágenes satelitales, especialmente las bandas térmicas, con los datos tomados en campo para diferentes tiempos.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se correlacionan las temperaturas calculadas a partir de bandas térmicas de imágenes satelitales con las temperaturas obtenidas por estudios geoquímicos en la zona de Santa Rosa de Cabal y parte norte del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz?

1.3 Justificación

- **Interés y motivaciones:** conocer la correlación de las temperaturas calculadas a partir de bandas térmicas de una campaña de imágenes satelitales con las temperaturas obtenidas por estudios geoquímicos, permite facilitar las exploraciones superficiales de recursos geotérmicos, especialmente en lugares de difícil acceso obteniendo información importante por medio de sensores remotos, además, de aumentar el conocimiento científico de una región en particular y refinar el modelo geoquímico conceptual.

- **Utilidad:** como apoyo en la exploración geotérmica, disminuiría gastos en la etapa de exploración superficial. Por otro lado, ayudaría al refinamiento de un modelo geoquímico conceptual que conlleva a una localización de pozos con mayores probabilidades de éxito.

- **Novedad del problema o temática de investigación:** en Colombia, no se ha desarrollado una correlación de información de temperaturas calculadas a partir de imágenes satelitales, con las temperaturas obtenidas mediante estudios geoquímicos, lo que refina el modelo geoquímico conceptual de una región en particular. Dentro de las contribuciones para la exploración geotérmica, podría ser una herramienta de suma importancia y utilidad en el momento de delimitar zonas de prospectos geotérmicos, donde con anterioridad a los estudios geoquímicos en campo se tengan datos de una manifestación térmica superficial.

2. Antecedentes

Desde los años 80 en Colombia se han realizado proyectos de exploración geotérmica, como lo señala Rayo (2012), cuando afirma que, en 1983, la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) adelantó estudios para la delimitación de zonas de interés geotérmico que incluyeron geología, geovulcanología, hidrogeología, geofísica y estudios ambientales. Así mismo, manifiesta que, en 1988, Sturcho et al. propusieron que el sistema hidrotermal para el Volcán Nevado del Ruiz (VNR) se genera por una anomalía termal asociada con magma intruido en niveles someros y proponen dos sistemas de circulación de agua separados; mientras Giggenbach, en 1989, y Giggenbach et al., en 1991, sugirieron la existencia de un reservorio geotérmico extenso, sin especificar detalles de la geometría del reservorio y distribución de temperatura.

En la industria geotérmica, se han utilizado sensores remotos para ayudar a los estudios de varios prospectos. Mutua et al. (2013), realizaron un estudio de alta resolución con sistemas remotos aerotransportados con el infrarrojo térmico, en el prospecto geotérmico Silali en Kenia, donde manifestaron que la detección remota del infrarrojo térmico (TIR, siglas en inglés) proporciona datos de cobertura para investigar las manifestaciones superficiales de los sistemas geotérmicos aplicados a la exploración geotérmica y al monitoreo y la investigación, además de un método para el mapeo rápido y cuantificación de las características geotérmicas de la superficie, siendo un apoyo de la evaluación de nuevos recursos. Debe aclararse que el uso de los TIR de alta resolución no separa los otros aspectos de la ciencia (geología, geoquímica, geofísica), sino que proporciona una herramienta única para las investigaciones iniciales que contribuyen al estudio detallado de la exploración geotérmica.

Mboin (2011), para el prospecto geotérmico Silali en Kenia, usó imágenes satelitales Landsat 5 para caracterizar la cobertura terrestre y generar el mapa del recurso geotérmico, a partir de las bandas 7,3,1, donde por medio de clasificación supervisada y no supervisada, identificó seis tipos de cobertura, pómez, vegetación, lava, agua clara, agua no clara y arena, pudiendo afirmar que la clasificación de imágenes digitales se convierte en una tecnología utilizable en mapas de cobertura y uso del suelo, así como en el conocimiento de las propiedades reflectivas de materiales (tipos de roca, cobertura vegetal, etc.), que se constituyen en datos básicos para un campo geotérmico.

Pastor (2010) desarrolló un mapeo geotérmico, aplicando la detección remota térmica, del Lago Naivasha, localizado en la parte central del Valle del Rift de Kenia (KRV, siglas en inglés). Con las imágenes de TM-6 reconoció tendencias NW-SE paralelas a subparalelas a las divisiones térmicas que coinciden con las características estructurales presentes en el área. En las imágenes también fueron identificados cuerpos de agua, áreas de agricultura, estructuras urbanas, drenajes, rocas secas, suelos, zonas húmedas. Las manifestaciones geotérmicas, como fumarolas y zonas alteradas, se lograron visualizar claramente, principalmente al NE-SW que corresponde a la dirección

de la Zona de Falla Oikaria. Las temperaturas del Lago Naivasha, fueron calculadas con el software ILWIS, teniéndose temperaturas entre 0 - >60°C. Las manifestaciones térmicas y las características estructurales en general muestran una relación con el alto flujo de calor. Las diferencias de temperatura en la imagen térmica también pueden ayudar en la descripción y distribución de varios tipos de rocas.

Calzada (2016) identificó las oportunidades de los datos de percepción remota como una alternativa en las fases de prefactibilidad y seguimiento de sistemas geotérmico a través de una metodología capaz de localizar áreas con potencial geotérmico mediante información de imágenes L7 ETM+. La percepción remota, geología y geotermia se muestran como bloques de conocimientos básicos, donde la interrelación permite la identificación de áreas con potencial geotérmico, a través de manifestaciones geoespaciales como lo es la cartografía de temperatura de superficiales producto de la identificación de patrones anómalos en la concentración de la temperatura en la superficie.

El mencionado estudio se focalizó en nueve zonas geotérmicas de México (cinco en Jalisco y cuatro en Michoacán), donde los campos La Soledad (Jalisco) con 51 MW y Los Negritos (Michoacán) con 20 MW, presentan los mayores potenciales para la exploración. El proyecto incluyó el uso de imágenes Landsat 7 ETM+, donde se emplearon las bandas ETM3 y ETM4, a las cuales se les realizó calibración radiométrica, corrección atmosférica, cálculo de NDVI, cálculo proporción de vegetación, cálculo de emisividad, remuestreo de emisividad, paralelamente con la banda ETM6 (terma), se calculó la radiancia del sensor, la temperatura de brillo, para con ello calcular la temperatura de la superficie terrestre y original el respectivo mapa, lo que permitió asegurar: "la medición de temperatura por percepción remota, es una alternativa para los métodos de exploración tradicional. Las variaciones de temperatura en la superficie terrestre en relación a la presencia de fuentes de calor pueden ser medido y mapeadas usando la radiación en el infrarrojo termal. La identificación de anomalías térmicas (puntos calientes) puede sugerir indicios de áreas con recurso geotermal".

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Correlacionar las temperaturas calculadas a partir de banda térmica en imágenes satelitales con las aportadas por estudios geoquímicos, en la zona de Santa Rosa de Cabal y parte norte del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz.

3.2 Objetivos específicos

Determinar las temperaturas con imágenes Landsat con la banda termal para la zona de estudio

Compilar información de estudios de campo de temperatura para la zona de estudio

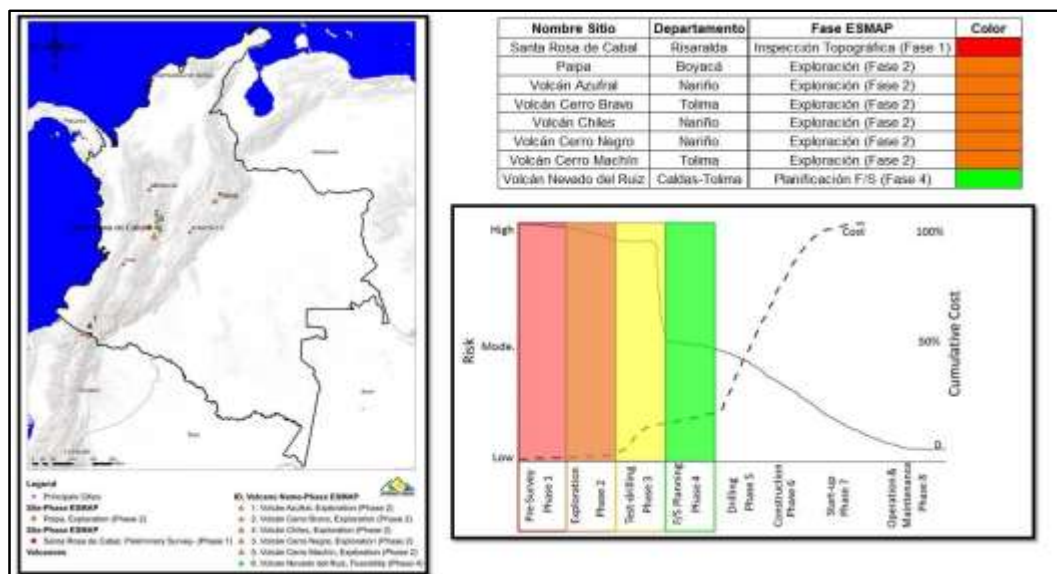
Correlacionar las temperaturas de estudios geoquímicos con las temperaturas calculadas con la banda termal y evaluar su nivel de concordancia.

Identificar con base en la información térmica áreas en las imágenes de satélite con potencial para estudios geotérmicos en las áreas de estudio.

4. Referente Contextual

El desarrollo de un proyecto típico de generación geotérmica, de acuerdo con Gehringer & Loksha (2012), comprende siete fases: inspección topográfica preliminar, exploración, perforación de prueba, revisión y planificación del proyecto, desarrollo de campo y perforación de producción, construcción y arranque-puesta en servicio. En Colombia, de acuerdo con Hernández, Cardona, & Vega (2016), hay ocho proyectos geotérmicos, que comprenden desde la fase 1 (inspección topográfica preliminar) hasta la 4 (revisión y planificación del proyecto), que se recogen en la Figura 1.

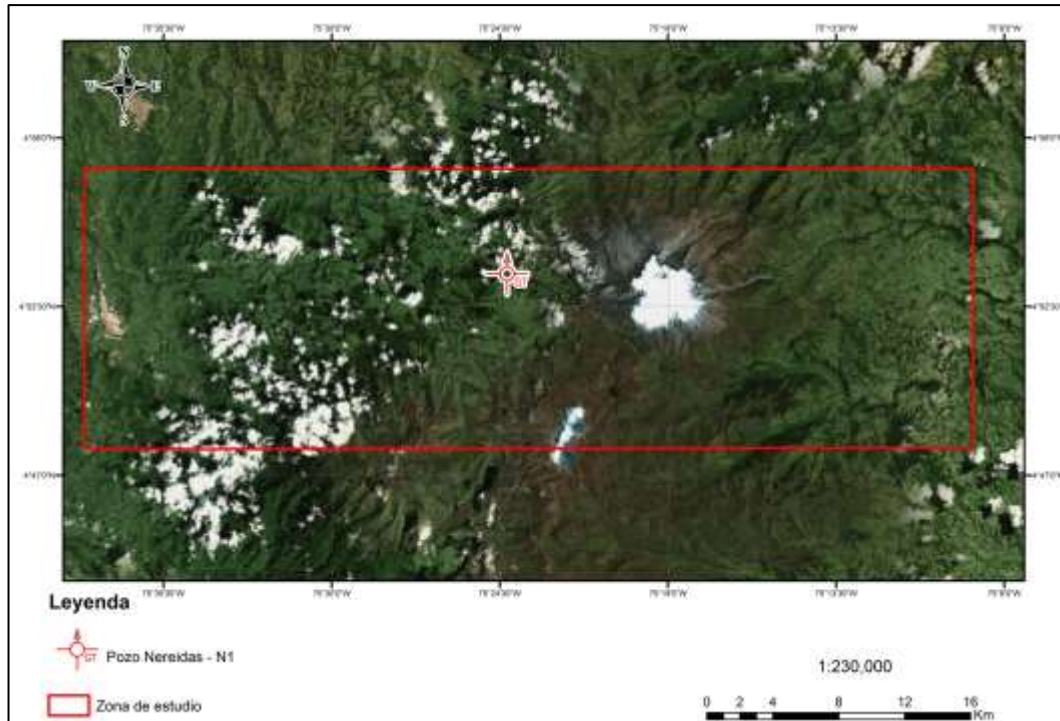
Figura 1. Estado actual de los proyectos geotérmico en Colombia (modificado de Hernández et al., 2016).



La zona de estudio (Figura 2) comprende desde el Volcán Nevado del Ruiz (Fase 4), hasta Santa Rosa de Cabal (Fase 1). Siendo la zona del Volcán Nevado del Ruiz (VNR) la que tiene mayor desarrollo geotérmico, El NVR según el SGC (s.f), “posee una forma alargada en dirección NE - SW, algo achatado y con un diámetro mayor en su base de 15 km de longitud, con un cráter activo de 870 x 830 m de diámetro y profundidad de 247 m (cráter Arenas). La Olleta, al W, y La Piraña, al E, son dos volcanes parásitos o secundarios del Nevado del Ruiz. El drenaje es radial excéntrico y en el edificio volcánico nacen los ríos Güalí, Lagunillas y Recio, afluentes del río Magdalena, y el río Chinchiná, afluente del Cauca; se trata de valles estrechos, profundos y de alta pendiente”. De acuerdo con CHEC (2016), en la zona se realizó el primer pozo geotérmico exploratorio Nereidas 1, perforado en 1997 con una profundidad de 1469 m. La zona de Santa de Cabal (Risaralda), se encuentra en estudios exploratorios iniciales, donde el principal uso de los recursos geotérmicos, son piscinas termales con fines turísticos. El municipio está localizado al sur oriente del departamento de Risaralda, a 1840 msnm (Santa Rosa de Cabal, s.f.).

En los últimos años las dos empresas energéticas en Colombia, ISAGEN y Grupo EPM, han desarrollado estudios geotérmicos. Actualmente, el desarrollo de proyectos geotérmicos está siendo financiado por varias entidades internacionales, como Fondo de Desarrollo Geotérmico (GDF) para Latinoamérica, USTDA, Bancoldex.

Figura 2. Área de estudio y localización de pozo Nereidas 1



5. Referente Normativo y legal

Colombia cubre sus crecientes necesidades de energía con plantas hidroeléctricas mayoritariamente, seguidas de termoeléctricas, con poco desarrollo de otras fuentes alternativas, aunque el fenómeno de El Niño en 2014, constituyó un llamado de alerta.

Lo anterior hace entendible que en el país no exista con un marco normativo para el desarrollo de energía a partir de geotermia, sin embargo, mediante la Ley 1715 del 2014 (Congreso de la República, 2014), se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, con la finalidad de “establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional”. En su cap. III, se dedica a los incentivos a la inversión en proyectos de FNCER¹.

Dentro del marco legal del uso de las energías alternativas en Colombia, la Ley 142 y 143 de 1994, establece un régimen de actividades para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, correspondiente a las funciones constitucionales y legales que compete al Ministerio de Minas y Energía.

Entre otras reglamentaciones, se debe asegurar la disponibilidad de los recursos necesarios para cubrir los subsidios otorgados para atender las necesidades básicas de electricidad para población de los estratos I, II, III y los de los menores ingresos del área rural. (Jaimes, 2016).

A pesar que en Colombia no se tiene una regulación exclusiva para geotermia, algunos países latinoamericanos han desarrollado normativas específicas, además naciones para Islandia, Nueva Zelanda y Estados Unidos han sido pioneros en este tipo de legislación.

Para dar una noción de la reglamentación en algunos países que cuentan con potencial geotérmico y sus diferencias en la reglamentación sea específica o no para geotermia, la Tabla 1 muestra la comparación de los aspectos legislativos, considerando en ley exclusiva para geotermia, concepto de geotermia, normativa de exploración y explotación.

¹ Saldivia (2018), Análisis de Legislación Comparada sobre Energía Geotérmica, CEGA.

Tabla 1. Comparación de aspectos legales sobre geotermia en siete países. (Construida a partir de Saldivia, 2018).

	Ley Geotermia Exclusiva	Concepto de Geotermia	Tiempo de Exploración	Tiempo de Explotación
Colombia	Ninguna	Energía obtenida a partir de aquella fuente no convencional de energía renovable que consiste en el calor que yace del subsuelo terrestre (ley 1715/2014). "La combinación natural del agua con una fuente calórica endógena subterránea cuyo resultado es la producción espontánea de aguas calientes o de vapores, y la existencia de fuentes calóricas endógenas subterráneas a las cuales sea posible inyectar agua para producir su calentamiento, o para generar vapor. También son recursos geotérmicos, a que se aplican las disposiciones de este Código y las demás legales, los que afloran naturalmente o por obra humana con temperatura superior a 80 grados centígrados o a la que la ley fije como límite en casos especiales. Los recursos geotérmicos que no alcancen los 80 grados centígrados de temperatura mínima serán considerados como aguas termales" (Decreto 2811/1974)	Los estudios podrán tener una duración de hasta 2 años de acuerdo con su índole (Decreto 2811/1974). La Ley 685/2001 contempla un período de 3 años para realizar estudios exploratorios en el área.	De acuerdo con el recurso a explotar se constituye el tiempo máximo (Decreto 2811/1974). Los contratos de concesión serán de hasta 30 años (Decreto 2655/1981). El período podrá ser por el término pedido por el proponente y con un máximo de 30 años (Ley 685/2001).
Chile	Ley 19,657/1999 o Ley de Concesiones Geotérmicas	Aquella que se obtenga del calor natural de la tierra, que puede ser extraída del vapor, agua, gases, excluidos los hidrocarburos, o a través de fluidos inyectados artificialmente para este fin (Art.3, Ley 19,657/1999).	Hasta 5 años para hacer actividades exploratorias (Art. 37, Ley 19,657/1999)	No se tiene un tiempo definido para las actividades de explotación.
Costa Rica	Ninguna	Energía almacenada en forma de calor debajo de la superficie de la Tierra, la cual puede ser utilizada por el ser humano; incluye el calor almacenado en rocas, suelo y aguas subterráneas, cualquiera que sea su temperatura, profundidad o procedencia. Se puede clasificar de acuerdo con su temperatura y presión (entalpía) (Art.3, Reglamento de la Ley N° 5961/1976).	No tienen un tiempo determinado ya que es realizado por el estado.	Para las centrales eléctricas de 20.000kw (20MW) tendrán un período de explotación no mayor de 20 años (Art. 5, Ley 7200/1990)
México	Ley de Energía	Un recurso renovable asociado al calor natural del	Los permisos de exploración	El tiempo de explotación es de 30

	Ley Geotermia Exclusiva	Concepto de Geotermia	Tiempo de Exploración	Tiempo de Explotación
	Geotérmica 2014	subsuelo, que puede ser utilizado para la generación de energía eléctrica, o bien, para destinarla a usos diversos (Ley de Energía Geotérmica/2014).	tienen vigencia de 3 años y pueden prorrogarse una vez por 3 años más (Art. 17, Ley de Energía Geotérmica/2014).	años (Art. 26, Ley de Energía Geotérmica/2014).
Perú	Ley 26848/1197 o Ley Orgánica de Recursos Geotérmicos	La energía calorífica que se presume o pueda encontrarse bajo la superficie de la Tierra en diferentes formas, diferentes de recursos hidrocarburíferos (Ley 26848/1997).	Las actividades exploratorias tendrán un plazo de 3 años extendible por 2 años más (Art. 15, Ley 26848/1997).	El tiempo de la concesión es de 30 años (Art. 18, Ley 26848/1997).
Islandia	Ley de la República N° 9513/2008 o Ley de Promoción del Desarrollo, Uso y comercialización de los recursos de energía renovable y otros propósitos	Cualquier elemento, compuesto y energía que pueda extraerse de la tierra, ya sea en forma sólida, líquida o gaseosa, independientemente de la temperatura a la que se encuentren (Ley 9513/2008).	Un tiempo variable entre 1-15 años (Geothermal Transparency Guide).	Aunque no se indica el plazo, señala que una licencia de planta de energía expira 10 años después de la fecha de emisión si el titular de la licencia no ha comenzado a desarrollarse en ese momento y 15 años después de la fecha de emisión si una planta de energía se ha construido, pero no ha comenzado a funcionar (Art. 4, Ley 65/2003).
Nueva Zelanda	Ley de Energía Geotérmica 1953	Energía derivada o derivada de y producida dentro de la Tierra por un fenómeno de calor natural; e incluye todo el vapor, el agua y el vapor de agua, y cada mezcla de todos o alguno de ellos que se haya calentado por energía geotérmica, y todo tipo de materia derivada de un orificio y por el momento con o en cualquiera de dichos vapores, agua, vapor de agua o mezcla (Ley de Energía Geotérmica 1953).	No se menciona, pero se entiende incluido en el plazo de explotación.	La concesión es de hasta 35 años (Sección 123 literal d, Ley 69/1991).

6. Referente teórico

6.1 Energía Geotérmica

La energía geotérmica es “obtenida a partir de una fuente no convencional de energía renovable que consiste en el calor que yace del subsuelo terrestre” (Congreso de la República, 2014), la cual puede considerarse como “una energía limpia, de fuente casi inagotable, que no genera gases contaminantes para la atmósfera, que fácilmente se puede aprovechar para acondicionamiento de espacios, y su transformación en nuevas fuentes de energía como la eléctrica” (Capelo, 2017).

Los recursos geotérmicos son una de las fuentes renovables más seguras y estables de energía eléctrica adecuados para producción de carga base, y desde sus primeros desarrollos a principios del siglo XX, su explotación ha sido cada vez mayor.

Los nuevos recursos de vapor seco de alta entalpía (como Larderello en Italia) se están volviendo cada vez más escasos y los recursos de alta entalpía alrededor de todo el mundo están siendo explorados y explotados considerablemente.

Los recursos de entalpía media (temperatura máxima de fondo de pozo de 200 °C) son más difusos y se están considerando hoy en día como el potencial sin explotar más prometedor: miles de MW están siendo desarrollados en todo el mundo, especialmente en Turquía, U.S.A., Latinoamérica y Sureste de Asia. (Spadaci et al., 2017).

Para Gehringer & Loksha (2012), el calor geotérmico se produce “constantemente por la Tierra a partir de la descomposición del material radioactivo en el núcleo del planeta. El calor se mueve hacia la superficie por medio de convección y conducción. En la corteza, el gradiente de temperatura² es típicamente de 30°C por kilómetro, pero puede ser tan alto como 150°C por kilómetro en áreas geotérmicas calientes”. El uso más común y extendido durante mucho tiempo para la geotermia era como fuente de calor en spa y piscinas termales, pero en el siglo XX se inició el uso del vapor geotérmico para producción eléctrica (con la pionera instalación experimental en Larderello (Toscana, Italia) en 1904), hasta la construcción actual de plantas geotérmicas con una capacidad aproximada de 11 GWe, aunque solo representa el 0,3% de la energía generada en el mundo.

El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la tierra, que se genera por fenómenos geológicos a escala planetaria; el término energía geotérmica es a menudo utilizado para indicar aquella

² Un gradiente de temperatura describe los cambios en temperatura en una ubicación en particular. En términos de geofísica, se mide usualmente en grados Celsius por kilómetro vertical (°C/km).

porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre.

Por tanto, la energía geotérmica es el calor de la Tierra que es liberado por conducción a un flujo promedio mundial de 82 mW/m^2 . Este calor natural se manifiesta normalmente en el aumento de la temperatura con la profundidad, siendo el gradiente promedio a nivel mundial del orden de 30°C/km , sin embargo, las variaciones de la temperatura no son las mismas en todos los lugares de la Tierra. (Capelo, 2017).

Los sistemas geotérmicos son clasificados, según Gehringer & Loksha (2012), “de acuerdo con la fuente de calor, tipo de transferencia de calor, temperatura del yacimiento, estado físico, utilización, escenario geológico”:

- Según la naturaleza geológica: - Sistemas geotérmicos volcánicos, con fuente de calor principal a partir de intrusiones calientes o de magma, localizados dentro o cerca de complejos volcánicos, - Sistemas convectivos de fracturas controladas, donde la costra caliente en áreas tectónicamente activas, es su fuente de calor, - Sistemas geotérmicos sedimentarios, ubicadas en muchas cuencas sedimentarias del mundo con capas sedimentarias permeables a profundidad mayores a 1 Km y gradientes geotérmicos superiores a 30°C/Km , - Sistemas geopresurizados, análogos a yacimientos de petróleo y gas geopresurizados en los que el fluido atrapado en trampas estratigráficas puede tener presiones cercanas a los valores litostáticos, y - Sistemas geotérmicos de roca seca caliente (HDR) o mejorados (con diseño de ingeniería) (EGS), conformados por volúmenes de roca calentados mediante volcanismo o flujo de calor anormalmente alto, con baja o nula permeabilidad, lo que no permite su explotación de forma convencional.

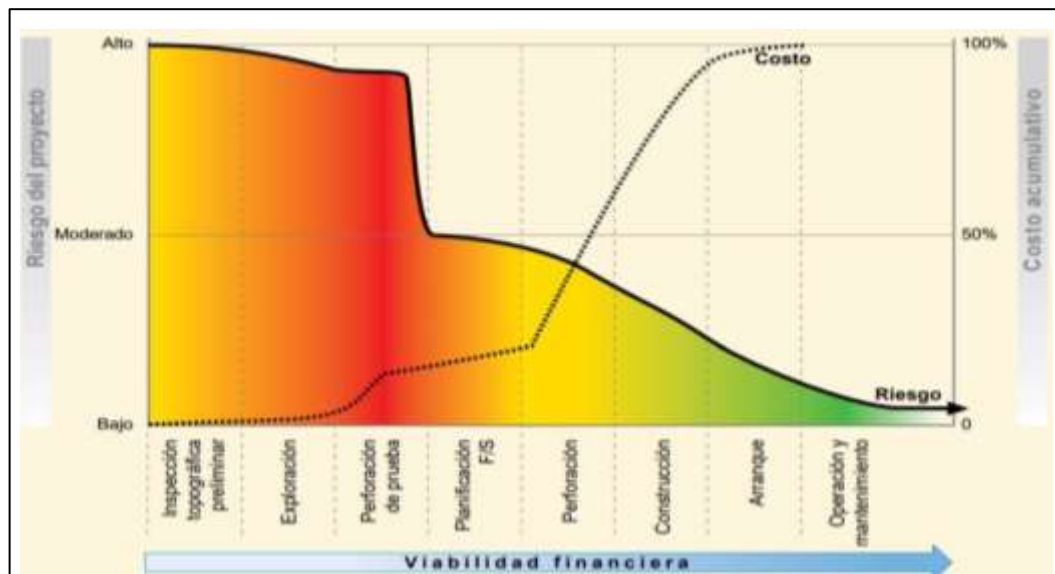
- En función con la temperatura, los sistemas geotérmicos se clasifican en: - Alta ($>200^\circ\text{C}$), cuyas temperaturas se pueden encontrar alrededor de los límites de placas tectónicas, zonas calientes y áreas volcánicas, que pueden generar energía con tecnología convencional de vapor, flash, vapor seco, - Media ($150^\circ\text{C}-200^\circ\text{C}$), temperaturas ubicadas principalmente en geología sedimentaria o adyacentes a recursos de alta temperatura, con las cuales se puede generar energía mediante centrales eléctricas binarias, y - Baja ($<150^\circ\text{C}$), que pueden encontrarse en cualquier parte con un gradiente de temperatura promedio de 30°C/km , para uso directo como calefacción, procesos, etc.

Gehringer & Loksha (2012), presentan un modelo de desarrollo por fases para un proyecto típico geotérmico, aceptado mundialmente que contempla los riesgos del proyecto y el costo acumulativo, donde los riesgos más altos se encuentran en las fases iniciales del proyecto geotérmico y su costo acumulativo es inferior (Figura 3):

- Dentro la fase de Inspección topográfica preliminar (Fase 1), se incluye el primer reconocimiento de un área geotérmica con base de estudios nacionales o regionales, mediante revisión de información geológica, revisión de imágenes satelitales y áreas, y procedimientos para la obtención de licencias ambientales o

permisos para acceder al terreno. Esta fase puede durar hasta un año si no se cuenta con estudios geológicos previos.

Figura 3. Fases de un proyecto geotérmico, riesgo y costo acumulativo (Gehring & Loksha, 2012).



- La fase Exploración (Fase 2), corresponde a estudios superficiales, que sirven para confirmar los hallazgos preliminares de la Fase 1, con una duración de hasta dos años, dependiendo de la extensión del terreno y de los estudios disponibles. Generalmente en esta fase se incluye muestreos de fuentes termales existentes, estudios geológicos donde se incluye muestreo de rocas ya sean ígneas, metamórficas o sedimentarias, estudios geofísicos, donde se incluyen por ejemplo el método magnetotelúrico (MT), Método Transitorio Electromagnético (TEM siglas en inglés), estudios de anomalía de Bouguer como complemento del TEM y MT que sirve para la identificación de estructuras geológicas en el subsuelo. Muchos de los desarrolladores incluyen los orificios de gradiente de temperatura³.

- La fase de Perforación de Prueba (Fase 3), es la última fase exploratoria, aquí se diseña un programa de perforación con el fin de confirmar la existencia, ubicación y potencial del yacimiento, generalmente se perforan de 3 a 5 pozos de tamaño real (profundidad de 1.5 a 3.5 km y diámetro inferior del pozo de 7 a 8 pulgadas y diámetro superior de aproximadamente 20 pulgadas). En esta fase se realizan pruebas para conocer las propiedades físico-químicas del pozo, así como su interconexión.

- En la Fase de Revisión y planificación del proyecto (Fase 4), se realiza la evaluación de los datos aportados durante las fases exploratorias (1,2, 3), con

³ Agujeros de aproximadamente de 500 m de profundidad y aproximadamente 6 pulgadas de diámetro, estos son perforados para medir el cambio de temperatura a profundidad y calcular el gradiente térmico de ese sitio específico.

los resultados de la Fase 3, el desarrollador puede finalizar el estudio de factibilidad, incluyendo el componente financiero, programa de perforación. Como una parte del estudio de factibilidad en muchas ocasiones está contemplado la perforación de prueba, pero esto conlleva a un alto costo y riesgo para el desarrollador, y por tal motivo muchas empresas privadas no muestran mucho interés para desarrollar proyectos geotérmicos desde la fase inicial.

- La Fase de Desarrollo de Campo (Fase 5), da inicio en sí el proyecto geotérmico, que contempla la perforación de pozos de perforación y de reinyección. Generalmente, para la industria geotérmica se tiene un conjunto de 20 pozos, 13 pozos productores y 7 pozos reinyectores.

- La Fase de Construcción (Fase 6), abarca la instalación del sistema de vapor que consiste en un sistema de tuberías que van desde los pozos hasta la central eléctrica, planta eléctrica con turbinas, condensador.

- Con la Fase de Arranque y puesta en servicio (Fase 7), se logra que la planta inicie el funcionamiento regular, e involucra solucionar asuntos técnicos y contractuales con el proveedor de la planta.

- La Fase de Operación y mantenimiento (Fase 8), consiste en la limpieza los pozos existentes, perforar nuevos pozos y dar mantenimiento a otros equipos de campo.

Los costos promedios del desarrollo se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Costos promedio de desarrollo por fases (Modificado de Gehringer & Loksha, 2012)

Fase	Mínimo (Millones USD)	Máximo (Millones USD)
Fase 1. Inspección topográfica preliminar	0.5	1
Fase 2. Exploración	1	2
Fase 3. Perforación de prueba	10	25
Fase 4. Revisión y planificación del proyecto	Sumatoria fase 1 a 3 (11.5)	Sumatoria fase 1 a 3 (28)
Fase 5. Desarrollo de campo	40	120
Fase 6. Construcción	1 (M USD/MWe instalado)	2 (M USD/MWe instalado)
Fase 7. Arranque y puesta en servicio	Está incluido en la fase 6	Está incluido en la fase 6
Fase 8. Operación y mantenimiento	1 (M USD/año)	4 (M USD/año)

Para Marini (2000), el estudio del origen y evolución de fluidos volcánicos y geotérmicos es una de las mayores preocupaciones de los científicos por mucho tiempo, ya que las posibles fuentes aportan elementos mayores y trazas en las zonas de descarga (fumarolas, travertinos, etc.), que incluye magma, rocas huéspedes y fluidos circulantes en el subsuelo.

La mayor contribución de la geoquímica en la evaluación de recursos geotérmicos es la geotermometría, señalan Fridriksson & Ármannsson (2007), entendida como la aplicación de la geoquímica que infiere la temperatura del

reservorio desde la composición de los fluidos geotérmicos, ya que los sistemas geotérmicos consisten en rocas calientes y fluidos que ocupan la porosidad de las rocas. Los geotermómetros químicos pueden ser univariantes⁴ (basados en la concentración de un constituyente reactivo, siendo el más utilizado el de sílice) o en función de las proporciones de los componentes reactivos (siendo utilizado comúnmente el geotermómetro de Na/K⁵).

Fridriksson & Ármannsson (2007) manifiestan que:

- Los fluidos primarios en los depósitos sin alteración pueden ser líquidos (cuando están dominados por líquido), líquidos con poco vapor (sistemas geotérmicos en ebullición), y vapor con poca cantidad de líquido (sistemas dominados por vapor), aclarando que los sistemas geotérmicos de alta temperatura típicamente no se pueden obtener de manifestaciones geotérmicas naturales superficiales.

- Los fluidos disponibles en superficie (vapor geotérmico, soluciones geotérmicas hervidas y en algunos casos enfriadas, soluciones mixtas que involucran aguas subterráneas poco profundas y soluciones geotérmicas o vapor, aguas superficiales calentadas por vapor) para estudios geoquímicos generalmente han sido afectados por procesos de ebullición y separación de fases, enfriamiento, oxidación y mezcla son fluidos secundarios, trabajados por los geoquímicos durante la exploración de superficie.

- Los vents de vapor geotérmico (en ocasiones denominados fumarolas) se encuentran entre las manifestaciones superficiales comunes de los sistemas geotérmicos de alta entalpía, aunque algunos sistemas geotérmicos no presentan este tipo de actividad. Muchas de estas salidas de vapor son identificables a la distancia ya que se puede observar vapor ascendiendo o por el olor característico del H₂S.

- Las soluciones geotérmicas hervidas o enfriadas se encuentran donde la tabla de agua caliente llega a la superficie. En estos sistemas las aguas termales se producen a elevaciones más bajas, como en los flancos de los volcanes, pues las fumarolas generalmente están en elevaciones más altas. Estas soluciones generalmente tienen un pH de neutro a alcalino y bajo contenido de gas disuelto, aunque las enfriadas por conducción en el camino a la superficie generalmente tiene un pH más bajo pues no han perdido el CO₂ y H₂S disueltos.

⁴ Hay geotermómetros de gases univariantes que presentan mayor complejidad y permiten identificar varios posibles conjuntos de minerales secundarios en los posibles amortiguadores de las concentraciones de gas.

⁵ Para Fridriksson y Ármannsson (2007), se supone que la relación Na/K en soluciones geotérmicas está limitada por equilibrios simultáneos entre la solución geotérmica y el feldespato Na y K, relación controlable mediante el equilibrio de intercambio iónico entre los minerales de Na y K-arcilla. Una característica del termómetro de Na/K es que se equilibran rápidamente, como en el termómetro de cuarzo, donde la diferencia puede ser indicativa del historial de enfriamiento o calentamiento del fluido geotérmico.

- Las soluciones mixtas, se pueden formar aguas ricas en CO₂, cuando las soluciones geotérmicas sin hervir se mezclan con agua fría, donde el vapor rico en gas se condensa en acuíferos poco profundos. Las mezclas de soluciones geotérmicas hervidas y aguas subterráneas resultan en mezclas con un bajo contenido de gas, pero con temperaturas y concentraciones de componentes no volátiles intermedios entre los de agua subterránea y las soluciones geotérmicas. Las aguas superficiales calentadas con vapor tienen valores de pH cercanos a 1, debido a la oxidación del H₂S cuando el vapor reacciona con las aguas superficiales oxigenadas, dándose la formación del ácido sulfúrico.

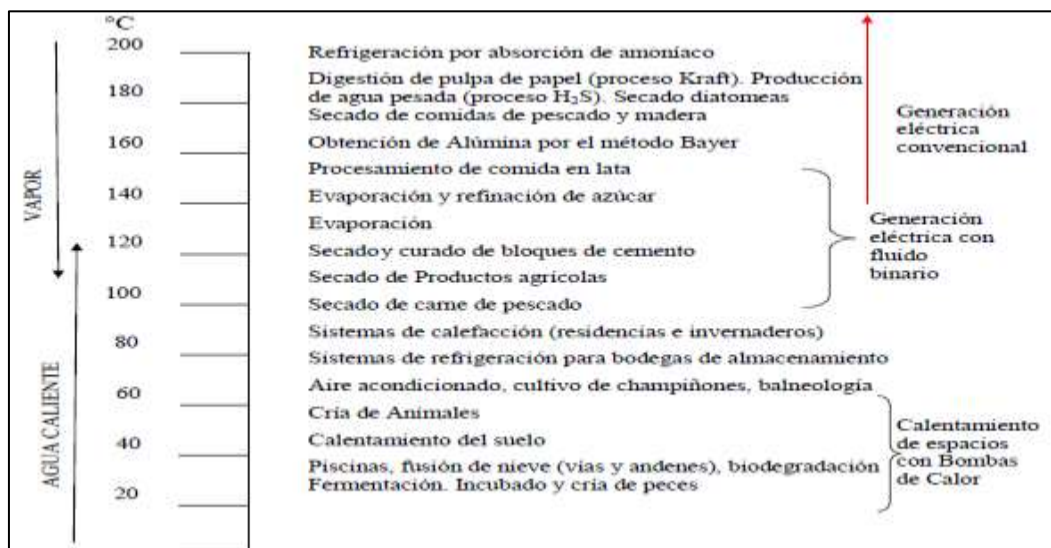
Reed y Spycher (1984, citados por Fridriksson y Ármannsson, 2007). propusieron un método para evaluar las temperaturas del yacimiento, basado en el cálculo del estado de saturación de minerales secundarios típicos en los sistemas geotérmicos en un rango de temperaturas, cuando la intersección se hace en cero indica el equilibrio.

Alfaro, Aguirre y Jaramillo (2002), señalan que, en 1958, Forero presenta una colección de estudios realizados en el territorio colombiano de manantiales termales que fue titulado *Fuentes Termales de Colombia*, donde parece existir una relación genética de los manantiales de Santa Rosa de Cabal con los del Nevado del Ruiz (VNR). Adicionalmente, realizan muestreos y caracterizan manantiales en el municipio de Santa Rosa de Cabal (Risaralda)⁶, con cuyos resultados plantean la posible existencia de un sistema geotérmico independiente al asociado al del VNR.

Como las aplicaciones de los fluidos geotérmicos derivan esencialmente de su temperatura y minerales, Alfaro et al. (2002), clasifican el fluido geotérmico de acuerdo a la temperatura en: - indirectos (su principal uso es la generación de energía eléctrica) y - directos (con usos comúnmente asociados a invernaderos, sistemas de calefacción, refrigeración, acuicultura, deshidratación de vegetales), en tanto, usando la clasificación por aniones dominantes, “se calcularon los geotermómetros de Na/K, K/Mg, cuarzo sin pérdida de vapor y con máxima pérdida de vapor y calcedonia”, y para aguas consideradas profundas, con pH>5.5, “concentración de cloruros relativa a aniones dominantes superior a 20% y concentración de litio mayor que 1mg/l o de boro mayor 5mg/l”, mediante geotermómetros basados metales alcalinos. Además, con base en la temperatura geoquímica estimada en el reservorio y el diagrama Lindal (Figura 4) establecen preliminarmente las aplicaciones industriales posibles del fluido profundo inferido.

⁶ Cinco se ubican en las cercanías de San Vicente y ocho cerca a los termales de Santa Rosa.

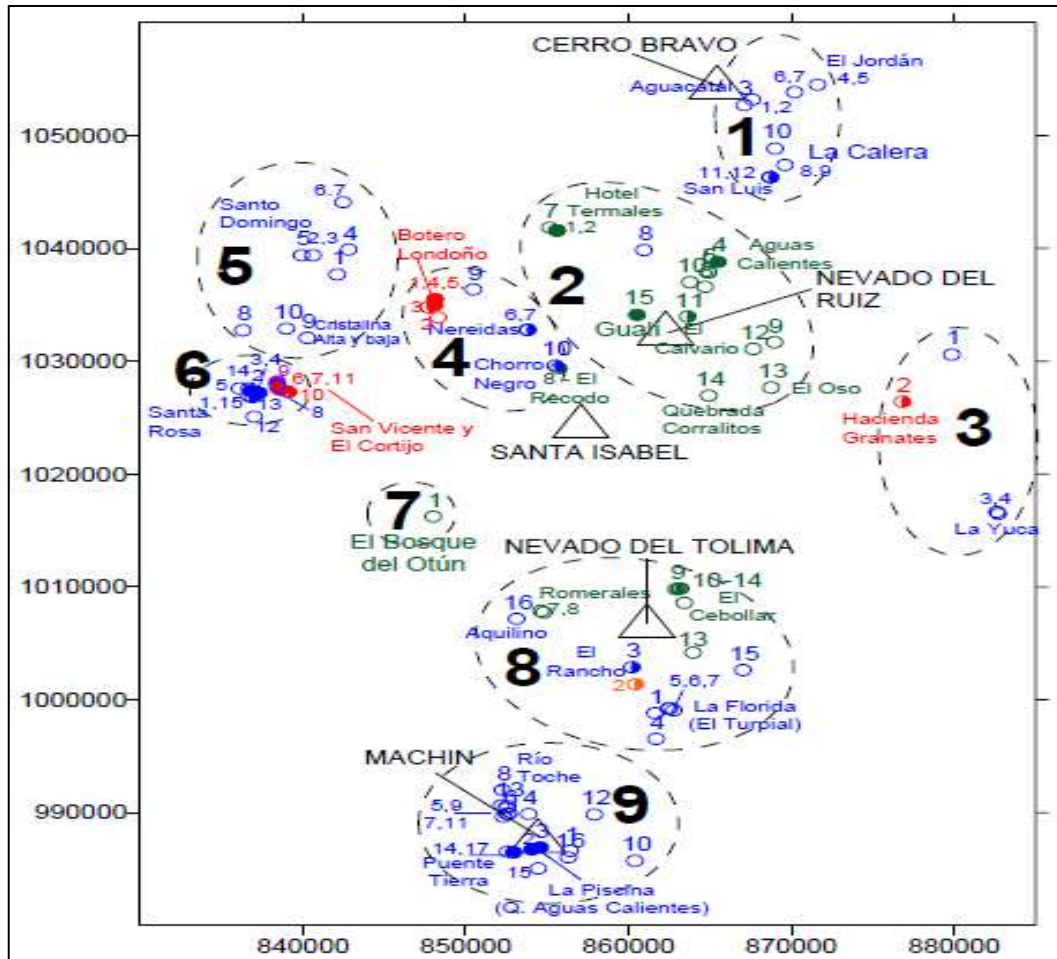
Figura 4. Diagrama Lindal (Alfaro et al., 2002)



A partir de su estudio, Alfaro et al (2002) señalan al Complejo Volcánico Cerro Bravo-Cerro Machín (CVCBCM), como el de mayor ocurrencia de manantiales termales en Colombia, clasificados en nueve grupos por su distribución espacial (Figura 5):

- El grupo 2, al norte y oriente del VNR, consta de 15 manantiales con composición esencialmente “ácida sulfatada de origen magmático” con un pH<2 y alta concentración de cloruros, “o hidrotermal (aguas calentadas por vapor con pH moderadamente ácido (2-5.5)”. Su rango de temperaturas oscila entre 9 y 63°C (la más baja en el manantial Arenales y la mayor en el Hotel Termales El Ruiz 1), mientras su pH muestra un rango entre 1.32 y 6.11.
- El grupo 4, al occidente del VNR se conforma con 10 manantiales. Sus temperaturas tienen un rango entre 12 y 93°C (la más baja en La Poa y la mayor en Hacienda Termales Botero Londoño II), con pH entre 5.81 a 7.42. De acuerdo con el diagrama triangular de Na-K-Mg se detecta una alta concentración relativa de magnesio, bicarbonatadas y en menor proporción cloruradas, con mezcla de agua geotérmica con agua superficial fría. En los años 90, fue perforado el Pozo Nereidas 1, que se constituye en el único pozo geotérmico perforado en el país.
- El grupo 5 “son clorurados neutros de alta temperatura, reflejando el contacto del fluido geotérmico con la superficie”.
- El sector cercano a Santa Rosa conforma el grupo 6, con 15 manantiales, la mayoría de alta temperatura y con alta concentración de cloruros, “compatible con el contacto del fluido geotérmico con la superficie”. El rango de temperaturas está entre 16 y 91°C (la menor en Peñaranda Río San Eugenio, y la temperatura más alta en San Vicente VI), con pH entre 6 y 7.43. El diagrama triangular de Na-K-Mg señala que la alta concentración de Mg, clasificadas como aguas bicarbonatadas principalmente.

Figura 5. Localización manantiales Complejo Volcánico Cerro Bravo- Cerro Machín (Alfaro et al., 2002)



6.2 Imágenes satelitales

Para INEGI (s.f.), “una imagen satelital es una representación visual de los datos reflejados por la superficie de la tierra que captura un sensor montado en un satélite artificial. Los datos son enviados a una estación terrena en donde se procesan y se convierten en imágenes, enriqueciendo nuestro conocimiento de las características de la Tierra en diferentes escalas espaciales”, concepto que Ramos (2017) complementa cuando afirma: “una imagen satelital no es más que una fuente de datos consistente en una imagen de matriz bidimensional. (...). Por tanto, como una imagen satelital es una disposición matricial numérica, entonces es posible realizar análisis estadísticos en las mismas, independientemente del sensor del cual provenga la información”.

A partir de Chuvieco (2008), puede realizarse un somero recuento histórico de la detección remota⁷:

- Las experiencias iniciales de la teledetección se dan en 1859, cuando Gaspar Félix de Tournachon obtiene las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo.
- Al año siguiente, se repite la experiencia sobre Boston, siendo James Wallace quien obtiene las fotografías, con el interés de un conocimiento detallado de la organización urbana.
- En 1909, Wilburg Wright adquiere la primera fotografía aérea.
- La primera cámara aérea se desarrolla en 1914, durante la Primera Guerra Mundial.
- La Segunda Guerra Mundial señala un notable desarrollo en las técnicas de teledetección, progreso dirigido al mejoramiento de la óptica de las cámaras de reconocimiento, con la introducción de nuevos sensores como el radar y se mejoran los sistemas de comunicación.
- A finales de los años 50, los avances de los sistemas de navegación permiten concebir los primeros ingenios espaciales.
- Durante la guerra fría uno de los objetivos es el espacio. Así, el lanzamiento del satélite soviético Sputnik en 1957 propulsa misiones civiles y militares para la exploración de La Tierra, Luna y otros planetas.
- En 1960, NASA pone en órbita el primer satélite de la TIROS, pionero en la observación meteorológica.

Por su parte, Landsat (2017), suministra la siguiente información cronológica, que se complementa en la Tabla 3:

- En 1972, la NASA lanza el Satélite de Tecnologías de Recursos de la Tierra (ERTS-1), renombrado como Landsat 1.
- En 1975 se lanza Landsat-2.
- En 1978 Landsat-3 es puesto en órbita. En 1982 lo es Landsat 4.
- Landsat 5 se lanza en 1984, que durante más de 30 años ha proporcionado información de La Tierra.
- Landsat 1-5 presentan escáner multiespectral (MSS en inglés), que consta de cuatro bandas espectrales con una resolución espectral de 60 metros, donde el tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur y 185 km de este a oeste.
- El sensor *Landsat Thematic Mapper* (TM) se lleva en Landsat 4 y Landsat 5, y las imágenes constan de seis bandas espectrales con una resolución

⁷ “La observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. Este vocablo es una traducción latina del término “*remote sensing*”, ideado a principios de los 70 para designar cualquier medio de observación remota.

La teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento e interpretación y para esto, necesariamente entre la superficie terrestre y el sensor debe existir una interacción energética ya sea por: - Reflexión de la energía solar. - Haz de energía artificial. - Emisión propia” (Ramos, 2017).

espacial de 30 metros para las bandas 1-5 y 7, y una banda térmica (Banda 6). El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste.

Tabla 3. Características de imágenes Landsat (elaborado a partir de Landsat, 2017)

	Bandas		Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Landsat 1-3	Landsat 4-5		
Landsat 1-5 Multispectral Scanner (MSS)	Banda 4- Verde	Banda 1- Verde	0.5 - 0.6	60
	Banda 5- Rojo	Banda 2- Rojo	0.6 - 0.7	60
	Banda 6- Infrarrojo cercano (NIR)	Banda 3- Infrarrojo Cercano (NIR)	0.7 - 0.8	60
	Banda 7- Infrarrojo cercano (NIR)	Banda 4- Infrarrojo Cercano (NIR)	0.8 - 1.1	60
Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM)	Banda 1- Azul		0.45 - 0.52	30
	Banda 2- Verde		0.52 - 0.60	30
	Banda 3- Rojo		0.63 - 0.69	30
	Banda 4- Infrarrojo Cercano (NIR)		0.76 - 0.90	30
	Banda 5- Infrarrojo de onda corta (SWIR) 1		1.55 - 1.75	30
	Banda 6 - Termal		10.40 - 12.50	120*(30)
	Banda 7- Infrarrojo de onda corta (SWIR) 2		2.08 - 2.35	30
Landsat 7	Banda 1- Azul		0.45 - 0.52	30
	Banda 2- Verde		0.52 - 0.60	30
	Banda 3- Rojo		0.63 - 0.69	30
Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Banda 4- Infrarrojo Cercano (NIR)		0.77 - 0.90	30
	Banda 5- Infrarrojo de Onda Corta (SWIR1)		1.55 - 1.75	30
	Banda 6- Termal		10.40 - 12.50	60 * (30)
	Banda 7- Infrarrojo de Onda Corta (SWIR2)		2.09 - 2.35	30
	Banda 8- Pancromática		0.52 - 0.90	15
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Banda 1- Ultra azul (costero / aerosol)		0.435 - 0.451	30
	Banda 2- Azul		0.452 - 0.512	30
	Banda 3- Verde		0.533 - 0.590	30
	Banda 4- Roja		0.636 - 0.673	30
	Banda 5- Infrarrojo Cercano (NIR)		0.851 - 0.879	30
	Banda 6- Infrarrojo de Onda Corta (SWIR1)		1.566 - 1.651	30
	Banda 7- Infrarrojo de Onda Corta (SWIR2)		2.107 - 2.294	30
	Banda 8- Pancromática		0.503 - 0.676	15
	Banda 9- "Cirrus"		1.363 - 1.384	30
	Banda 10- Infrarrojo Termal (TIRS1)		10.60 - 11.19	100 * (30)
	Banda 11- Infrarrojo Termal (TIRS2)		11.50 - 12.51	101 * (30)

- En 1996 Landsat 6 no logra alcanzar órbita.
- En 1999 se lanza Landsat-7, equipado con el sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).
- En 2013 se lanza Landsat-8, cuyas imágenes con Operational Land Imagenz (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las Bandas 1 a 7 y 9. La banda ultra azul 1 es útil para estudios costeros y de aerosoles. La banda 9 es útil para la detección de nubes de cirros. La resolución para la Banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Las bandas térmicas 10 y 11 son útiles para

proporcionar temperaturas superficiales más precisas y se recogen a 100 metros. El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste

- Está previsto el lanzamiento de Landsat-9 a finales de 2020.

Hantson et al. (2011), desarrollan un flujo pre-procesamiento de imágenes Landsat (Figura 6), constituida por:

- La corrección geométrica es la primera etapa para el uso de la información de imágenes satelitales es la georreferenciación, donde se le asigna a cada pixel su coordenada geográfica.

- Corrección radiométrica en el óptico se realiza en las bandas que están en el espectro óptico visible e infrarrojo cercano y medio, debe calcularse inicialmente las radiancias a partir de los coeficientes de conversión, que se obtiene de la Ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1: } Ll = G * ND * B$$

De dónde: Ll: radiancia espectral obtenida por el sensor

G: ganancia

ND: niveles digitales

B : sesgo

Para la obtención de radiancias en el espectro térmico se usa la ecuación, usando los coeficientes de calibración del sensor térmico (Ecuación 2):

$$\text{Ecuación 2: } x' = A + Bx + Cy + Dz + Ezx + Fzy \quad y' = A' + B'x + C'y + D'z$$

La temperatura de brillo se debe calcular con la fórmula (Ecuación 3)

$$\text{Ecuación 3: } T_{sen} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{T_r} + 1\right)}$$

Dónde:

T_{sen} : temperatura de brillo (K)

K1: constante de calibración 1

K2: constante de calibración 2

- Corrección atmosférica en el espectro óptico, es el más importante en el espectro visible que en el infrarrojo, se utiliza el método de Chávez para esta corrección. “El modelo toma en cuenta la transmisividad de la atmosfera en el camino Sol-Tierra y la dispersión atmosférica”, calculado con (Ecuación 4):

$$\text{Ecuación 4: } \rho = \pi * [L - La] * d^2 / \cos \theta * E_0 * \tau_1 * \tau_2$$

Dónde:

ρ Reflectividad

τ_1 Coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Sol- Tierra

τ_2 Coeficiente de transmisión atmosférica en el camino Tierra- sensor

La Es la radianza recibida por el sensor en un área donde sola hay contribución de la atmosfera

L Es la radianza del pixel a corregir

- Corrección topográfica, se usa la desviación típica (DT) en “pixeles de suelo desnudo observados bajos distintos ángulos de incidencia solar”. El método empírico-estadístico “generó mayormente valores de DT más bajos en los distintos análisis, considerándose el más adecuado”. Se describe con la Ecuación 5:

Ecuación 5: $\rho_{\lambda,h,i} = \rho_{\lambda,i} \cos \gamma_i m_\lambda - b_\lambda + \overline{\rho_{\lambda,i}}$

Dónde:

$\rho_{\lambda,i}$ Reflectividad de un píxel en terreno pendiente

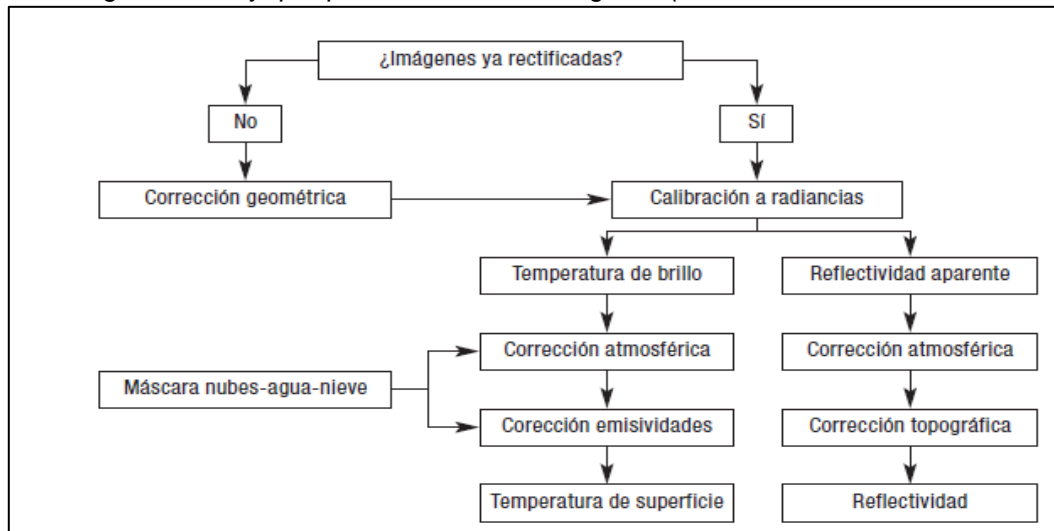
$\overline{\rho_{\lambda,i}}$ Reflectividad promedio

γ_i Ángulo de incidencia de un píxel

b_λ Ordenada en el origen de la regresión lineal

m_λ Pendiente de la regresión lineal

Figura 6. Diagrama de flujo pre-procesamiento de imágenes (Tomado de Hantson et al., 2011).



Estimación de la temperatura terrestre a partir de la radianza térmica es necesario realizar corrección atmosférica y de emisividad de la superficie. Para la corrección radiométrica a partir de las bandas térmicas Landsat y obtener la TST, con el algoritmo descrito por Jimenez-Muños et al. (2009). El método “se basa en corrección atmosférica a partir de la estimación del vapor de agua. Para llevar a cabo la corrección atmosférica se necesita una estimación del vapor de agua en la atmósfera y una estimación de las emisividades”.

Para Ke-sheng y Ming-yuan (2010), el uso de la detección infrarroja para explorar recursos geotérmicos es un método que ha sido desarrollado desde los años 70s. Dónde el principio básico es la identificación debido a la sensibilidad de reacción del infrarrojo medio (3-5 μ m) e infrarrojo lejano (8-14 μ m) espectros al cambio de temperatura. Ke-sheng y Ming-yuan (2010), manifiestan que se necesitan herramientas auxiliares de exploración geotérmica, incluyendo la teledetección satelital, con el fin de ahorrar tiempo y dinero, en el caso particular para la exploración geotérmica en Taizhou en la provincia de Jiangsu, usaron tecnología de imagen 3s, que se integra por RS, GIS y GPS. Taizhou, no presenta afloramientos naturales geotérmicos en superficie, los recursos han sido identificados por perforación petrolera. El uso de la teledetección satelital y la tecnología de imágenes múltiples 3S, para explorar los recursos geotérmicos con éxito según Ke-sheng y Ming-yuan (2010), debe existir un recurso subterráneo, y contar con tecnología de teledetección satelital que puede reflejar la posición, el tamaño, temperatura y niveles de distribución del depósito térmico.

Después de la corrección, registro y sintetización de datos MODIS con datos TM, los datos MODIS se establecieron como la banda roja, banda 3 y banda 4 de TM fueron configuradas como bandas verde y azul, generándose una imagen colorida, posteriormente se hizo un corte de densidad de datos MODIS de acuerdo con el valor de prueba de radiancia del área geotérmica conocida, obteniéndose un mapa de distribución de la anomalía geotérmica, que muestra las islas de calor de los recursos geotérmicos de Taizhou y zonas cercanas.

Wright, Lira y Ramsey (1990), seleccionaron un área de aproximadamente 9.6 km² centrado en el campo geotérmico de Los Azufres (México), usando una imagen Landsat 5 TM completa, donde el tamaño de píxel es de 30m x 30m para las bandas IR visibles y reflejadas en las Bandas 1-5 y 7, y un píxel de 120m x 120m para la banda térmica IR (Banda 6). Con el de identificar una firma característica de las áreas alteradas hidrotermalmente y mejorar las características geológicas lineales y relacionadas estructuralmente, Wright et al. (1990), experimentaron con diferentes combinaciones de calor falso generadas al mostrar varias combinaciones de bandas TM en los tres canales de color primario, la imagen de TM contiene siete bandas de información digital.

Se llevaron a cabo varios pasos de procesamiento en un intento de detectar una firma característica de las áreas alteradas hidrotermalmente y mejorar las características geológicas lineales y otras relacionadas estructuralmente. Uno de los pasos fue experimentar con diferentes imágenes de falso color producidas al mostrar varias combinaciones de bandas TM en los tres canales de color primario (rojo, verde y azul). Dado que la imagen de TM contiene 7 bandas de información digital, se puede mostrar que, al usar todas las combinaciones de banda disponibles, incluida la misma banda de TM en más de un canal del cañon, se pueden producir 343 imágenes de falso color diferentes. Para la banda 7, las áreas de alteración hidrotérmica, se observa una alta reflectancia, obteniéndose un color azulado brillante sobre las zonas con alteración. Wright et al. (1990), manifiestan que la banda IR térmica responde a las variaciones en la temperatura de la superficie y podrían reflejar los fenómenos geotérmicos de la superficie, pero manifiestan que la temperatura de la superficie es influenciada en un grado alto por la radiación solar, presencia o ausencia de vegetación más que por el flujo de calor del subsuelo, Wright et al. (1990), aseguran que las manifestaciones geotérmicas conocidas no se manifestaron en esa imagen.

Ferrer, Bate, Guerrero, Ferrer (1986), usaron imágenes LANDSAT que cubren el campo geotérmico Bacon-Manito en Filipinas, para analizar e interpretarlas para la definición del marco estructural regional del área. Ferrer et al. (1986), usaron dos escenas para la realización del estudio, usando transparencia de composición de falso color de las bandas, 4,5 y 7, donde el principal obstáculo fue la cobertura parcial por nubes. Donde la composición de falso color de las bandas 4,5 y 7 fueron elegidas por producir un mejor color de contraste en los datos crudos para la interpretación geológica. A pesar, de la gran cobertura de nubes, Ferrer et al. (1986), obtuvieron los lineamientos de

estructuras geológicas con imágenes LANDSAT del campo geotérmico Bacon-Manito, donde pudieron evidenciar cuatro sistemas principales con direcciones NW, NE, EW, NS.

Chan, Chang, Dao (2017), manifiestan que la energía geotérmica es un componente cada vez más importante de la energía verde en el mundo, dentro del desarrollo de la energía geotérmica es adquirir los prospectos locales y regionales, donde las exploraciones a un área a gran escala se basan principalmente en imágenes infrarrojas térmicas satelitales. Donde las imágenes Landsat 7 son utilizadas para la recuperación de la temperatura de la superficie terrestre, el lugar utilizado para este estudio fue Ilan Plain NE de Taiwan. Las imágenes fueron procesadas con corrección de terreno estándar, precisión geométrica y geométrica a través de la integración de los puntos de control terrestre y precisión topográfica mediante el modelo de elevación digital (DEM). Chan et al. (2017), lograron obtener mapas de temperatura a partir de las imágenes Landsat 7, donde obtuvieron como patrón indicativo de temperatura más baja en el área de estudio de aproximadamente 9°C y más alta de 27°C. Las temperaturas obtenidas fueron validadas con la investigación de campo de fuentes termales y perforaciones geotérmicas, los resultados implican que las ocurrencias de aguas termales y perforaciones son concordantes con las áreas de anomalía y adicionalmente los patrones de anomalías térmicas se correlacionan con el desarrollo de estructuras falladas en Ilan Plain.

Karki, Nawontniak, Bottenberg, McCurry, Welhan (2014), manifiestan que las anomalías geotérmicas del Parque Nacional de Yellowstone (YNP) se identifican y cuantifican utilizando los datos de la banda térmica Landsat 5 TM. Karki et al. (2014), se centraron alrededor del YNP en el NW de Wyoming, E de Idaho y S de Montana. Se usaron imágenes Landsat 5 TM, donde examinaron elevación, pendiente, insolación, vegetación, agua, humedad del suelo, tierra expuesta. Los datos utilizados fueron las imágenes Landsat 5 TM y para la banda 6 los datos se convirtieron a temperatura.

El método de sustracción de fondo multivariante utilizado en este estudio identificó anomalías geotérmicas en YNP a múltiples escalas, desde géiseres individuales hasta grandes fuentes termales y complejos de anomalías geotérmicas extensas. Este estudio es único en el sentido de que utilizó con éxito el análisis de regresión multivariante de los datos infrarrojos térmicos Landsat TM 5 para identificar anomalías geotérmicas mediante el desarrollo de un filtro basado en una explicación exhaustiva de las variables de fondo durante las condiciones sin nieve. Al alejarse de los enfoques más tradicionales de filtrado de nieve, este modelo puede ser entrenado para su uso en áreas geotérmicas potenciales en áreas sin acumulación de nieve. El trabajo futuro incluirá la prueba de la inclusión de una variable geológica en la regresión multivariante y la investigación de relaciones complejas entre variables independientes que pueden contribuir a la detección de anomalías falsas a lo largo de las tendencias del noreste. El modelo también se probará en regiones geotérmicamente activas

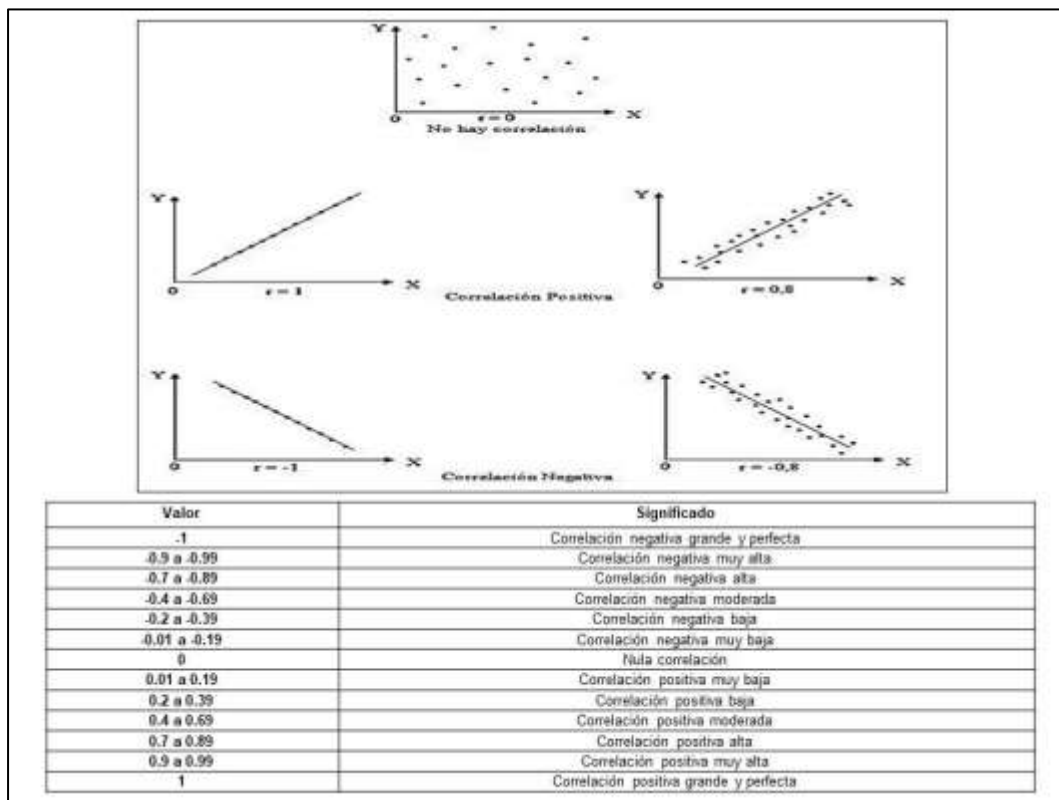
fuera de YNP para evaluar la solidez en diferentes zonas climáticas, con un enfoque en minimizar el tiempo requerido para el entrenamiento de coeficientes.

Los resultados de la aplicación del modelo actual en YNP sugieren que es una solución de bajo costo para la detección de anomalías geotérmicas en grandes áreas, tanto para grandes como para pequeñas características.

6.3 Procesamiento Estadístico

Dentro de los procesos de análisis estadístico, se tiene el coeficiente de correlación, para Suárez (2011), los coeficientes de correlación son medidas que indican la situación relativa de los mismos sucesos respecto a las dos variables, indicando por medio de una expresión numérica que indica el grado de relación existente entre dos variables y en qué medida se relacionan. Los valores de la relación varían entre +1 y -1, la magnitud indica el grado de asociación entre las variables, el valor de $r=0$ indica una relación inexistente, los valores de $r= +/- 1$ indican una correlación perfecta, positiva o negativa (Figura 7).

Figura 7. Valores de coeficiente de correlación



6.4 Métodos de interpolación

De acuerdo con Paredes et al. (2013), la interpolación espacial es un procedimiento con el cual se puede calcular el valor de una variable que ocupa una posición en espacio, conociendo el valor de esa variable en otra posición

espacial. Los métodos de interpolación se dividen en determinísticos y probabilístico. Según Paredes et al. (2013), los métodos de interpolación determinísticos “calculan un valor para celda de la cuadrícula, usando únicamente las propiedades físicas de las muestras”, siendo la ponderación en función inversa de la distancia o IDW (Inverse Distance Weighting) la más usada. En contraste Paredes et al. (2013), asegura que los métodos probabilísticos “infieren una gran cantidad de información utilizando muestras disponibles”, dentro de los métodos probabilísticos más utilizados son los derivados del Kriging.

7. Hipótesis de investigación

H₁: Las temperaturas de banda térmica, calculadas a partir de imágenes satelitales, se pueden correlacionar con las obtenidas en estudios geoquímicos de la misma zona, mediante una estrategia metodológica que arroje información pertinente, confiable y útil para la toma de decisiones frente a procesos de exploración geotérmica.

H₀: Las temperaturas de banda térmica, calculadas a partir de imágenes satelitales, no presentan correlación con las obtenidas en estudios geoquímicos de la misma zona, mediante una estrategia metodológica que arroje información pertinente, confiable y útil para la toma de decisiones frente a procesos de exploración geotérmica.

8. Metodología

8.1 Enfoque metodológico

El presente trabajo de investigación corresponde a un enfoque cuantitativo, según Hernández, Fernández, Baptista (2010), sin obviar algunos aspectos típicos del cualitativo, puesto que el enfoque cuantitativo mide fenómenos, manifestación termal en este caso, que se mide en grados, además del manejo estadístico y prueba hipótesis. Para el enfoque cualitativo incluyen características que conducen básicamente en ambientes naturales.

8.2 Tipo de estudio

Este trabajo es un estudio correlacional de temperaturas en fuentes geotermiales, obtenidas mediante dos técnicas diferentes (cálculo de banda térmica en imágenes satelitales y estudios geoquímicos).

8.3 Diseño de la investigación

De acuerdo con Hernández et al. (2010), el diseño del presente proyecto es fundamentalmente no experimental – transversal, puesto que con datos ya existentes se harán los procedimientos para relacionarlos y plantear una estrategia metodológica.

8.4 Población o unidad de trabajo

Para el proyecto se consideraron las zonas geográficas de Santa Rosa de Cabal y parte norte del Complejo Volcánico Nevado del Ruiz, ubicadas en la cordillera central colombiana, debido a su potencial geotérmico y la existencia de estudios previos.

8.5 Muestra y muestreo

Las manifestaciones termales consideradas para realizar el proyecto fueron aquellos con suficiente información a partir de estudios geotérmicos, situación indispensable para realizar el estudio de sus temperaturas.

8.6 Operacionalización de variables

La variable principal trabajada fue la temperatura de manifestaciones termales, obtenida por dos técnicas diferentes: calculadas a partir de bandas térmicas en imágenes satelitales y medidas en campo en estudios geoquímicos, al constituirse en el principal factor de cálculo de potencial geotérmico. Los datos de las manifestaciones se relacionaron, buscando un patrón de comportamiento. Los patrones obtenidos analizados en procura en uno que permita ser probado y planteado como base de la estrategia metodológica.

8.7 Técnicas e instrumentos de recolección de información

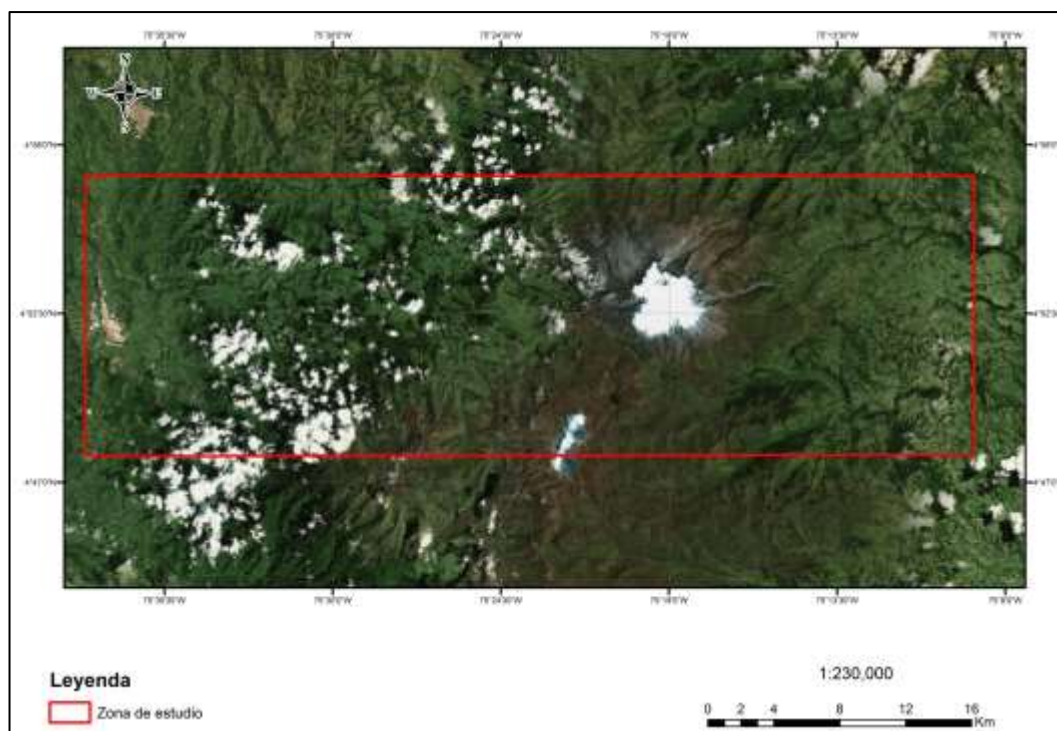
La recolección de la información se hizo mediante una revisión documental de publicaciones existentes sobre estudios geoquímicos en la zona de interés, estos datos fueron tomados de fuente abierta e información pública. Ella se complementó con la comunicación directa con instituciones del ramo, en busca de documentación inédita. En cuanto a las imágenes satelitales la obtención de la información se realizó mediante la descarga desde plataformas libres.

8.8 Plan de análisis

8.8.1 Fase 1. Determinación de las temperaturas con imágenes Landsat con la banda terminal correspondientes a los estudios previos seleccionados.

•Actividad 1: Obtención de las imágenes Landsat del sector de estudio, descargadas de portales web gratis, como EarthExplorer. La selección de las imágenes se realizó para el área limitada por los puntos (4°47'54"N, -75°38'5"W), (4°56'59"N, -75°38'5"W), (4°56' 59"N, -75°9'1" W) y (4°47'54"N, -75°9'1" W), que se muestra en la Figura 8, dentro del área de estudio se localizan 24 manantiales los cuales son objeto de análisis están contempladas en la Tabla 4.

Figura 8. Área de estudio



Las imágenes se obtuvieron del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos – Earthexplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y GLOVIS (<https://glovis.usgs.gov/>) para el periodo comprendido entre 1988 y 2017, siendo almacenadas en carpetas por años y a las seleccionadas se les aplicó un filtro de nubosidad de menor del 50%, debido a que algunas imágenes presentaban nubosidad en el área de interés.

Tabla 4. Manantiales dentro del área de estudio

No	Manantial	Latitud	Longitud	Municipio	Departamento
1	Gualí	4,902659	-75,3341	Casabianca	Tolima
2	Hacienda Termales Botero Londoño	4,914486	-75,4464	Villamaría	Caldas
3	San Vicente P4	4,837167	-75,5368	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
4	San Vicente P5	4,837167	-75,5368	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
5	San Vicente P7	4,837167	-75,5368	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
6	San Vicente P8	4,837167	-75,5368	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
7	San Vicente P9	4,837167	-75,5368	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
8	San Vicente P10	4,837167	-75,5368	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
9	San Vicente P11	4,837167	-75,5368	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
10	Pozo del Amor	4,8377	-75,549	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
11	Los Helechos	4,8375	-75,5392	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
12	Santa Elena P1	4,842143	-75,5558	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
13	Santa Elena P2	4,842143	-75,5558	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
14	Santa Elena P3	4,842143	-75,5558	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
15	Santa Elena P4	4,842143	-75,5558	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
16	Santa Elena P5	4,842143	-75,5558	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
17	Santa Elena P6	4,842143	-75,5558	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
18	Santa Elena P7	4,842143	-75,5558	Santa Rosa de Cabal	Risaralda
19	Hotel Termales	4,970208	-75,3785	Villamaría	Caldas
20	Aguas Calientes	4,945063	-75,2892	Casabianca	Tolima
21	Agua Blanca	4,880927	-75,258	Murillo	Tolima
22	Las Nereidas II	4,890618	-75,3946	Villamaría	Caldas
23	Chorro Negro	4,86034	-75,3787	Villamaría	Caldas
24	Botalón	4,845608	-75,2893	Murillo	Tolima

• Actividad 2: Realización de los procedimientos para corrección de las imágenes satelitales realizadas con el software ArcGIS. Las correcciones se realizaron para las bandas de Landsat-7, usando un toolbox que contiene las siguientes características (• Actividad 3: Aplicación de algoritmos para la obtención de las temperaturas. Para la obtención de temperatura se realizaron los siguientes pasos:

– Creación de File Geodatabase, utilizando el ArcCatalog de ArcGis 10.3, denominada Temperaturas.gdb.

– Composición de bandas a color, este paso se realizó con el fin de corroborar que la zona tenga muy bajo porcentaje de nubosidad. Para la composición de bandas a color se empleó del Arctool Box de ArcGis, el conjunto de Data Management Tools, las opciones de Raster Processing, la herramienta Composite Bands. La imagen resultante falso color, corresponde a la combinación de bandas 5,4,3 para Landsat 5 y Landsat 7, en tanto para Landsat 8, la combinación es 4,3,2.

–

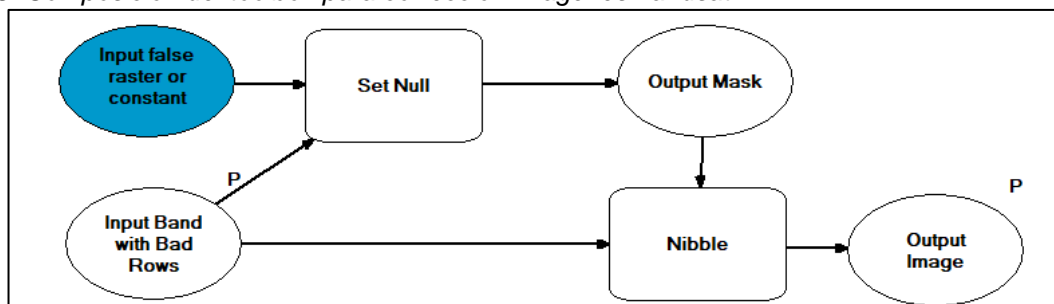
– Figura 8). La cual mediante métodos estadísticos permite rellenar los espacios con pérdida de información. Este proceso se realizó para la banda de interés del área de estudio, realizándose varias veces para mejorar los resultados.

• Actividad 3: Aplicación de algoritmos para la obtención de las temperaturas. Para la obtención de temperatura se realizaron los siguientes pasos:

– Creación de *File Geodatabase*, utilizando el ArcCatalog de ArcGis 10.3, denominada *Temperaturas.gdb*.

– Composición de bandas a color, este paso se realizó con el fin de corroborar que la zona tenga muy bajo porcentaje de nubosidad. Para la composición de bandas a color se empleó del Arctool Box de ArcGis, el conjunto de Data Management Tools, las opciones de Raster Processing, la herramienta Composite Bands. La imagen resultante falso color, corresponde a la combinación de bandas 5,4,3 para Landsat 5 y Landsat 7, en tanto para Landsat 8, la combinación es 4,3,2.

Figura 8. Composición del toolbox para corrección imágenes Landsat-7.



Teniendo la composición de color, y teniendo un *shapefile* con el área de interés, se recortó el área de interés de la composición de color y la banda térmica de interés (Banda 6 para Landsat 5 y Landsat 7, Banda 10 para Landsat 8). El recorte se realizó mediante el conjunto de herramientas del Arctool Box, denominado Data Management Tools, de las opciones de Raster Processing fue usado la opción Clip.

Los cálculos de la radianza se hicieron empleando la calculadora raster de ArcMap 10.3, que se encuentra en Arctool Box, dentro del conjunto de Spatial

Analyst Tool, Map Algebra y se seleccionó la opción de Raster Calculator, utilizando los valores presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores para cálculo de radianza.

Criterio	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
$LMIN_{\lambda}$	1.238	3.200	N/A
$LMAX_{\lambda}$	15.303	12.650	N/A
$QCALMIN$	1	1	N/A
$QCALMAX$	255	255	N/A
M_L	N/A	N/A	3.3420E-04
A_L	N/A	N/A	0.1000

Una vez se obtiene el valor de L_{λ} , se guardó el producto en formato raster en la base de datos geográfica como Rad_Año_Número imagen satelital. El valor de L_{λ} se reemplaza en la Ecuación 6 para obtener la temperatura en Kelvin:

$$\text{Ecuación 6. } T = \left(\frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \right)$$

De donde:

T Temperatura efectiva del satélite en Kelvin

$K2$ Constante de calibración 2

$K1$ Constante de calibración 1

L_{λ} Radianza espectral en watts/ (m²*ster*μm)

La Tabla 6 contiene las constantes de calibración 1 y 2.

Tabla 6. Valores de K1 y K2 (Adaptada de Landsat, 2018)

Sensor	Constante 1 – K1 (watts / (m ² *ster*μm))	Constante 2 – K2 (watts / (m ² *ster*μm))	Banda
Landsat 5	607.76	1260.56	6
Landsat 7	666.09	1282.71	6
Landsat 8	774.89	1321.08	10

Los cálculos se realizaron usando la calculadora raster de ArcMap 10.3. La imagen producto de este cálculo se almacena en la base de datos geográfica como TempK_Año_Número de Imagen satelital. Los datos para convertirlos de Kelvin a grados centígrados se utiliza la Ecuación 7.

$$\text{Ecuación 7 } T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15$$

8.8.2 Fase 2. Compilación de información de estudios de campo de temperatura para la zona de estudio.

- Actividad 1: Búsqueda de información de temperaturas y geología de fuente abierta para la zona de interés.
- Actividad 2: Seleccionar la información relevante para la zona de estudio.

8.8.3 Fase 3. Correlación las temperaturas de estudios geoquímicos con las temperaturas calculadas con la banda termal y evaluar su nivel de concordancia.

- Actividad 1: Seleccionar los estudios geoquímicos realizados para la zona de interés que aporten temperatura. Los manantiales seleccionados están localizados en el área de interés, para la obtención de los estudios de geoquímica, se utilizaron datos abiertos provenientes del Servicio Geológico Colombiano, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, los cuales tienen mediciones para los manantiales de interés desde los años 80s hasta la actualidad.

- Actividad 2: Elegir el método de evaluación de concordancia entre las dos temperaturas. El método de evaluación de concordancia elegido fue la correlación de Pearson.

- Actividad 3: Aplicar el método de evaluación de concordancia. Para la correlación de Pearson, se realizó separando por manantial las temperaturas promedio por año de los estudios geoquímicos y la obtenida por las imágenes satelitales.

La correlación se realizó con la sintaxis disponible en Excel, que se conforma de: $PEARSON(matriz1, matriz2)$

Donde:

matriz1 Es un conjunto de valores independientes, para el caso específico esta matriz son la temperaturas provenientes de estudios geoquímicos.

matriz2 Es un conjunto de valores dependientes, para el caso específico esta matriz se compone de las temperaturas calculadas de las imágenes satelitales.

La Ecuación 8 es la fórmula para el coeficiente de correlación de Pearson.

$$\text{Ecuación 8. } r = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}}$$

- Actividad 4: Encontrar la relación entre las temperaturas provenientes de estudios geoquímicos con las temperaturas calculadas con las imágenes satelitales y la banda térmica. El valor del píxel que se usó, fue aquel donde esta el manantial caliente, obteniéndose un único valor por manantial. Utilizando la clasificación de Suárez (2011), se establecen las correlaciones, cuyos valores y significados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores de correlación de Pearson (Suárez, 2011).

Valor	Significado
-1	Correlación negativa grande y perfecta
-0.9 a -0.99	Correlación negativa muy alta
-0.7 a -0.89	Correlación negativa alta
-0.4 a -0.69	Correlación negativa moderada
-0.2 a -0.39	Correlación negativa baja
-0.01 a -0.19	Correlación negativa muy baja
0	Nula correlación

Valor	Significado
0.01 a 0.19	Correlación positiva muy baja
0.2 a 0.39	Correlación positiva baja
0.4 a 0.69	Correlación positiva moderada
0.7 a 0.89	Correlación positiva alta
0.9 a 0.99	Correlación positiva muy alta
1	Correlación positiva grande y perfecta

8.8.4 Fase 4. Identificación con base en la información térmica áreas en las imágenes de satélite con potencial para estudios geotérmicos en el área de estudio.

- Actividad 1: Seleccionar las zonas con mayor interés geotérmico de acuerdo con las temperaturas de geoquímica y el cálculo a partir de las imágenes satelitales. Se utilizó métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos, disponibles en ArcMap 10.5, tales como IDW y Kriging, estos métodos se aplican a los *shapefiles* con los temperaturas de diferentes manantiales obtenidos por medio de datos abiertos.

Las interpolaciones se realizaron usando las herramientas de *Spatial Analyst Tool del ArcTool Box*, donde el conjunto empleado fue el de interpolación, usando dos de las opciones (IDW y Kriging)

- Actividad 2: Delimitar zonas de interés geotérmico donde puedan realizarse mayores estudios de superficie.

La delimitación de las zonas se realizó teniendo en cuenta las áreas que presentaron mayores correlaciones encontradas en la Fase 3, y la distribución de las temperaturas superficiales.

9. Resultados

En total 101 imágenes satelitales se procesaron, para un período entre 1999 al 2017, de donde fueron tenidas en cuenta las que se obtuvieron valores con temperaturas muy bajas (máxima y mínima), lo que se determinó como fuera de rango. Por ello, se excluyeron 24, siendo 77 las usadas para el proceso de correlación (Tabla 8), de la cuales, algunas presentaron alta nubosidad.

Tabla 8. Cantidad de imágenes consideradas en el proceso

Criterio	Total	%
Temperaturas de valores máximos dentro del rango (Tenidas en cuenta)	61	60.40
Temperaturas con valores dentro del rango (Tenidas en cuenta)	14	13.86
Temperaturas con valores máximos superiores a 70°C (Tenidas en cuenta)	2	1.98
Temperaturas con valores fuera de rangos o huecos (No tenidas en cuenta)	24	23.76

La Tabla 8 contiene el año de la imagen, su número respectivo -ya que se emplearon varias imágenes para el mismo año-, radianza mínima y máxima calculada, temperatura mínima y máxima en Kelvin, temperatura mínima y máxima en grados centígrado, además de una columna de comentarios.

Los valores de correlación se resumen en la Figura 8, siendo frecuente la correlación positiva muy baja (6 manantiales, correspondiente al 25%), seguido por las correlaciones negativa muy baja y negativa baja. En el Anexo A se encuentran las correlaciones por manantial.

Figura 8. Correlaciones encontradas en los manantiales considerados

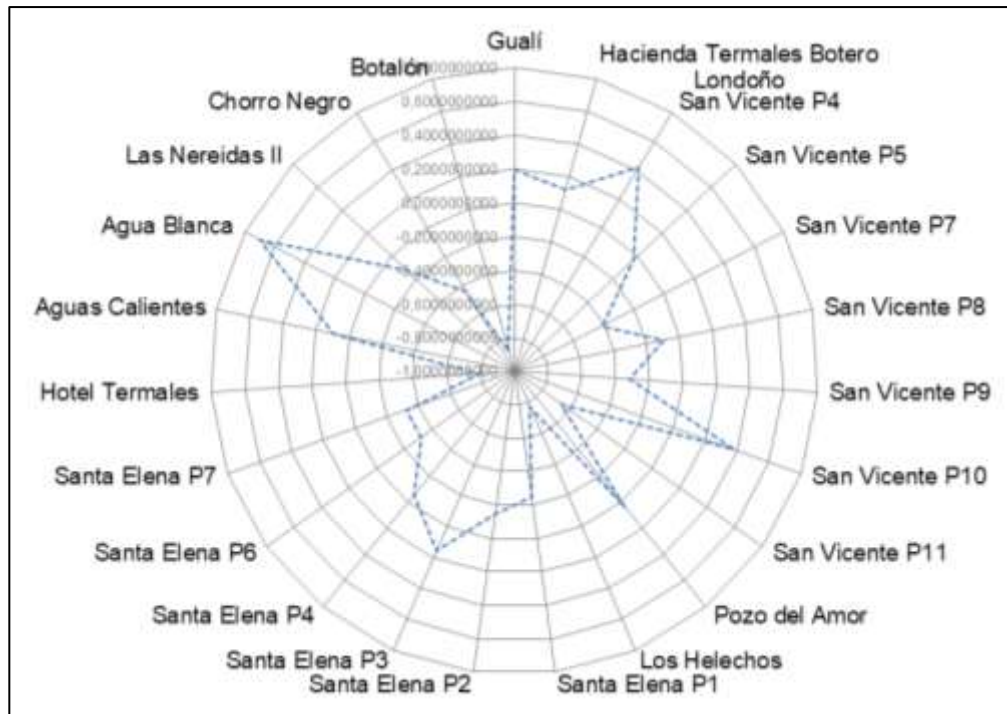


Tabla 9. Resumen cálculo de temperaturas

Año	No.	Radianza		Temperaturas K		Temperaturas C		Comentarios
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	
1999	6	1.7522	5.01926	215.414	262.359	-57.736	-10.791	Valores fuera de rango
1999	2	-0.462764	5.73913	129.352	269.819	-143.798	-3.33096	Valores fuera de rango
1999	7	3.91178	9.50456	249.507	302.037	-23.6429	28.8872	Valores superiores dentro del rango dentro del rango
1999	10	2.52743	9.44919	229.747	301.621	-43.4028	28.4714	Valores superiores dentro del rango dentro del rango
1999	11	3.91178	9.50456	249.507	302.037	-23.6429	28.8872	Valores superiores dentro del rango dentro del rango (T°C)
1999	9	2.75055	7.91622	233.486	288.617	-39.6644	15.4675	Mucha nubosidad, Valores dentro del rango
2000	1	-1.29337	3.30267	129.352	241.465	-143.798	-31.6851	Valores fuera del rango
2000	3	2.41669	8.06483	227.894	290.757	-45.2536	17.6065	Valores dentro del rango
2000	4	-1.29337	7.95409	129.352	289.844	-143.798	16.6941	Valores dentro del rango
2000	5	1.5307	7.89871	210.565	289.385	-62.5853	16.2352	Valores dentro del rango
2000	6	-1.29337	9.00619	129.352	298.246	-143.798	25.096	Valores superiores dentro del rango (T °C), presenta huecos
2000	8	3.69029	10.5013	246.679	309.309	-26.4713	36.1585	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2000	2	2.69355	8.89544	232.432	297.388	-40.7176	24.2381	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2000	7	3.2473	9.00619	240.69	298.246	-32.4605	25.096	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2000	9	3.2473	9.00619	240.69	298.246	-32.4605	25.096	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2001	2	-0.462764	6.51436	129.352	277.264	-143.798	4.11356	Valores incoherentes
2001	3	3.41342	9.06157	242.992	298.673	-30.1583	25.5229	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2001	4	4.24403	11.3879	253.571	315.468	-19.5787	42.3176	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2001	5	-0.484055	4.20374	130.843	252.913	-142.307	-20.2369	Valores incoherentes
2001	6	-1.89783	4.42697	130.843	255.503	-142.307	-17.6471	Valores incoherentes, Presenta huecos
2001	7	2.69355	6.62511	232.432	278.284	-40.7176	5.13437	Valores fuera del rango, altísima nubosidad
2001	8	5.63528	10.5997	268.304	308.612	-4.8457	35.4616	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2001	9	5.09858	10.8009	262.846	309.992	-10.3043	36.8423	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2002	2	0.743701	4.65502	188.671	258.014	-84.4789	-15.1359	Valores fuera del rango
2002	3	-2.64193	4.09213	130.843	251.586	-142.307	-21.5635	Valores fuera del rango, Presenta un hueco en la varias zonas
2002	4	-0.409646	5.28268	130.843	264.755	-142.307	-8.39484	Valores fuera del rango, Presenta un hueco al NE del VNR
2002	1	6.88327	11.6827	279.908	315.884	6.75806	42.7336	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2002	5	5.70236	11.2706	268.964	313.161	-4.1855	40.0108	Valores superiores dentro del rango (T°C), alta nubosidad
2002	6	5.5011	9.5263	266.97	300.995	-6.18024	27.8448	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2003	1	-1.41417	2.38071	130.843	227.528	-142.307	-45.6221	Valores fuera del rango
2003	3	0.371653	5.625472	171.26	268.496	-101.934	-4.65387	Valores fuera del rango
2003	2	6.77165	12.0547	278.923	318.298	5.7731	45.1479	Valores superiores dentro del rango (T°C)

Año	No.	Radianza		Temperaturas K		Temperaturas C		Comentarios
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	
2003	4_1	3.17662	3.34826	239.743	242.112	-31.4074	-31.0378	Valores fuera del rango
2003	5	0.371653	4.98504	171.216	261.647	-101.934	-11.5027	Valores fuera del rango
2003	7	6.31393	12.3996	274.782	320.501	1.63196	47.3511	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2003	8	5.56819	11.9414	267.639	317.567	-5.51059	44.4169	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2003	9	5.56819	10.9351	267.639	310.905	-5.51059	37.755	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2003	10	5.43403	10.3984	266.295	307.217	-6.85474	34.0667	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2004	1	4.57657	7.85059	257.194	288.084	-15.9558	14.9341	Valores dentro del rango
2004	2	5.0315	9.25795	262.14	299.018	-11.0404	25.8677	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2004	3	3.42142	9.59339	243.099	301.484	-30.0511	28.3342	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2004	4	2.34803	8.92252	226.973	296.501	-46.1766	23.3513	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2004	5	5.63528	12.1427	268.304	318.863	-4.8457	45.7128	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2005	1	5.16567	9.72756	263.546	302.457	-9.60376	29.3075	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2005	2	2.07968	7.78205	222.217	287.524	-50.9328	14.3745	Valores dentro del rango.
2005	3	5.09858	10.1301	262.846	305.334	-10.3043	32.1838	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2005	4	5.83654	11.4047	270.271	314.053	-2.87888	40.903	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2006	1	5.566819	10.7339	267.639	309.534	-5.51059	36.3838	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2006	2	3.42142	9.45921	243.099	300.503	-30.0511	27.3534	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2006	3	5.09858	11.5389	262.846	314.94	-10.3043	41.7896	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2006	4	3.15307	11.0022	239.411	311.359	-33.7388	38.2091	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2007	1	2.47206	8.89544	228.827	297.388	-44.3229	24.2381	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2007	2	1.86294	7.78796	217.688	288.462	-55.4623	15.3121	Valores dentro del rango
2007	3	5.70236	10.868	268.964	310.449	-4.18555	37.2995	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2008	1	2.97043	7.89871	236.683	289.385	-36.4673	16.2352	Valores dentro del rango
2009	1	2.97043	8.3417	236.683	293.007	-36.4673	19.8574	Valores dentro del rango
2009	2	4.96441	9.19087	261.428	298.519	-11.7222	25.3686	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2009	3	3.75685	8.52	247.462	293.411	-25.6883	20.2609	Valores dentro del rango.
2009	4	5.43402	10.1301	266.295	305.334	-6.85474	32.1838	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2010	1	-0.241268	6.016	129.352	272.541	-143.798	-0.608704	Presenta algunos huecos
2010	2	3.41342	9.50456	242.992	302.037	-30.1583	28.8872	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2010	3	5.83654	11.0022	270.271	311.359	-2.87888	38.2091	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2010	5	5.43402	10.9351	266.295	310.905	-6.85474	37.755	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2011	1	0.700091	4.355478	186.267	254.883	-50.1437	20.3026	Valores dentro del rango
2011	2	0.700091	4.35478	186.266	254.881	-86.8841	-18.2693	Valores fuera del rango
2012	2	5.29984	10.1301	264.931	305.334	-8.21884	32.1838	Valores superiores dentro del rango (T°C)

Año	No.	Radianza		Temperaturas K		Temperaturas C		Comentarios
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	
2012	3	5.16567	8.98961	263.546	297.009	-9.60376	23.8587	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2012	4	3.42142	8.25165	243.099	291.305	-30.0511	18.155	Valores dentro del rango. Alta Nubosidad
2012	5	4.62898	9.5263	257.779	300.995	-15.3714	27.8448	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2012	6	5.16567	8.98961	263.546	297.009	-9.60338	23.8587	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2013	1	5.0315	10.3313	262.14	306.748	-11.0104	33.5985	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2013	2	3.95811	9.05669	249.964	297.514	-23.1862	24.3641	Mucha nubosidad, Valores superiores dentro del rango (T°C)
2013	3	4.83024	8.65417	259.987	294.45	-13.1634	21.2999	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2013	4	4.96441	10.3984	261.428	307.217	-11.7222	34.0667	Mucha nubosidad. Valores superiores dentro del rango (T°C)
2013	5	4.09228	9.45921	251.588	300.503	-21.5616	27.3534	Mucha nubosidad. Valores superiores dentro del rango (T°C)
2013	6	5.5011	11.7402	266.97	316.259	-6.18024	43.1092	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2014	1	0.129744	0.149127	154.406	151.934	-121.216	-118.744	Valores fuera del rango
2014	2	1.89098	5.16313	219.519	263.278	-53.6309	-9.87216	Valores fuera del rango
2014	3	3.339254	6.40401	243.046	274.994	-30.1038	1.84445	Valores fuera del rango
2014	5	5.70236	10.7339	268.964	309.534	-4.1855	36.3837	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2014	6	5.83024	11.5911	269.765	313.251	-3.38528	40.1005	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2014	7_1	5.76603	10.6631	269.163	307.259	-3.98721	34.1094	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2015	1	4.0456	9.0061	258.539	306.021	-14.6105	32.8711	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2015	2	2.07746	7.26257	222.995	282.323	-50.1547	9.17346	Valores fuera del rango
2015	3	2.80435	7.1055	234.852	281.022	-38.2981	7.87238	Valores fuera del rango
2015	4	1.89098	5.1613	219.519	263.278	-53.6309	-9.87216	Valores fuera del rango
2015	5	5.97071	16.302	271.56	343.493	-1.58981	70.3428	Valores superiores dentro del rango (T°C), muy alto
2015	6	5.70236	11.4047	268.964	314.053	-4.18555	40.903	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2015	7	5.97071	16.302	271.56	343.493	-1.58981	70.3428	Valores superiores dentro del rango (T°C), muy alto
2015	8	5.70236	11.4047	268.964	314.053	-4.18555	40.903	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2016	1	4.76315	8.45291	259.255	292.886	-13.8952	19.7357	Valores dentro del rango. Alta Nubosidad
2016	2	2.07968	8.92252	222.217	296.501	-50.9328	23.3513	Mucha nubosidad. Valores superiores dentro del rango (T°C)
2016	3	5.0.15	9.79465	262.14	302.941	-11.0104	29.7913	Mucha nubosidad. Valores superiores dentro del rango (T°C)
2016	4	5.0315	9.72756	262.14	302.457	-11.0104	29.3075	Mucha nubosidad. Valores superiores dentro del rango (T°C)
2016	5	4.83024	10.063	259.987	304.859	-13.1634	31.7088	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2016	6	5.08994	10.0528	262.536	303.156	-10.6143	30.006	Valores superiores dentro del rango (T°C)
2017	1	4.29354	8.65417	253.965	294.45	-19.1851	21.2999	Mucho Nubosidad. Valores superiores dentro del rango (T°C)
2017	2	3.28724	7.64787	241.279	286.421	-31.8712	13.2706	Mucha nubosidad, Valores dentro del rango.
2017	3	4.83024	8.85543	259.987	295.992	-13.1634	22.8417	Mucho Nubosidad. Valores superiores dentro del rango (T°C)
2017	4	1.610008	3.35433	212.808	242.195	-60.3423	-30.9554	Valores incoherentes, altísima nubosidad

Este estudio no presentó valores para los correlación negativa grande y perfecta, correlación negativa muy alta, correlación positiva muy alta, correlación positiva muy grande y perfecta, tampoco ningún manantial presentó correlación nula.

Las Figura 9, 10 y 11 muestran algunos ejemplos de las imágenes procesadas, la zona de mayor correlación, los manantiales que fueron muestreados para el año de la imagen satelital y la zona de interés.

Dentro de las temperaturas calculadas, se obtuvieron algunas negativas, se debe tener en cuenta que la zona de estudio, se encuentra glaciario del Volcán Nevado del Ruiz, además teniendo en cuenta lo encontrado por Nugroho y Dirgahayu (2015), donde las temperaturas en campo fue de aproximadamente 80°C, mientras que la calculada con la imagen LST Landsat 8 fue de 24°C, de donde los autores manifiestan que la diferencia significativa de las temperaturas se debió principalmente a la densa vegetación alrededor del sitio de fumarolas, la cual puede cubrir la distribución de la energía térmica emitida por las fumarolas. De acuerdo con lo anterior, la zona presenta alta vegetación, por lo tanto la diferencia entre las temperaturas de superficie y las calculadas pueden deberse al efecto de la vegetación.

Figura 9. Zona de mayor correlación 2008

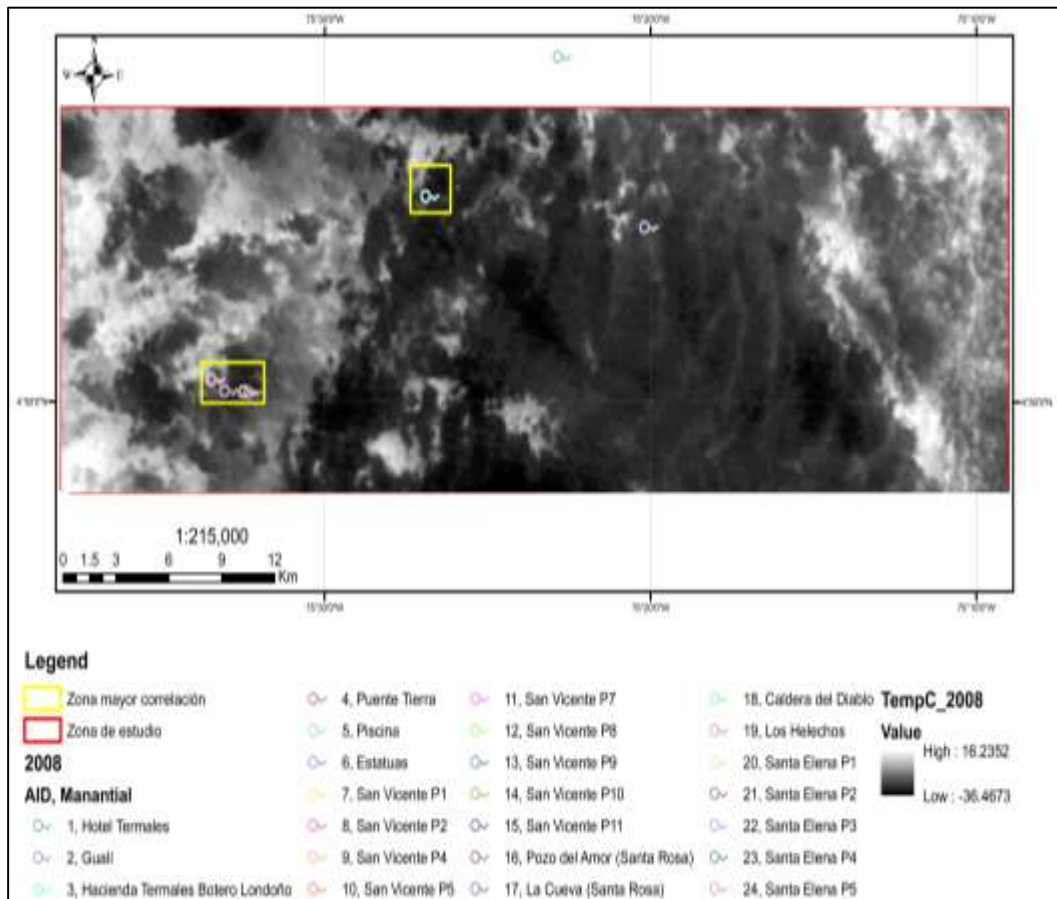


Figura 10. Zona de mayor correlación 2009

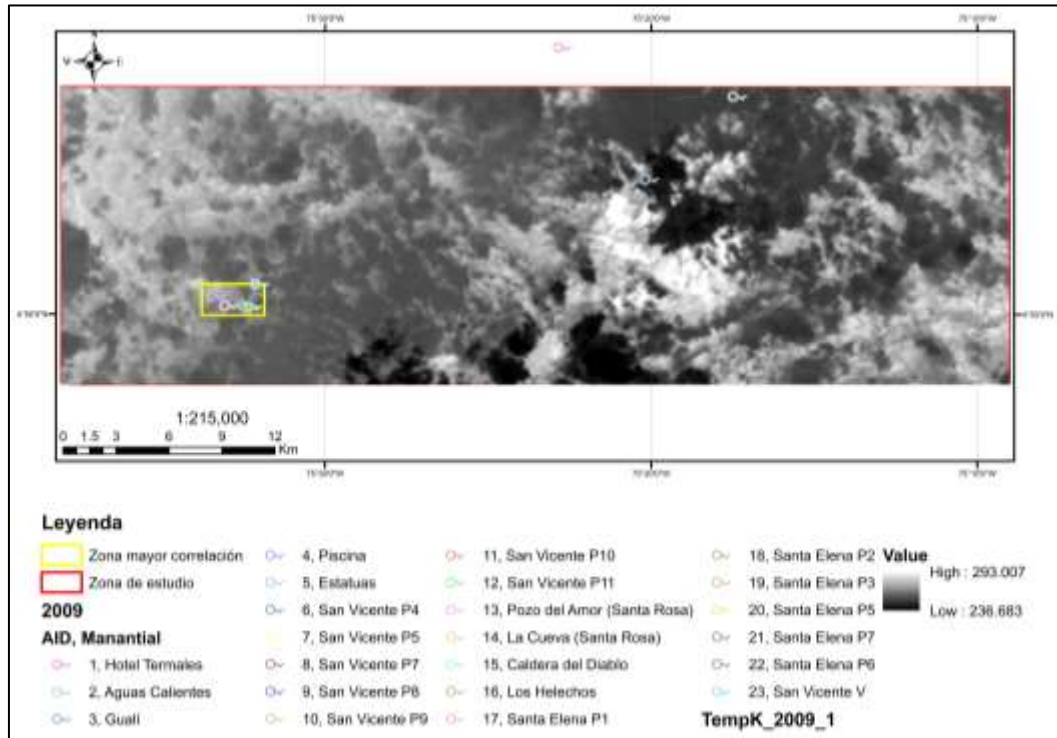
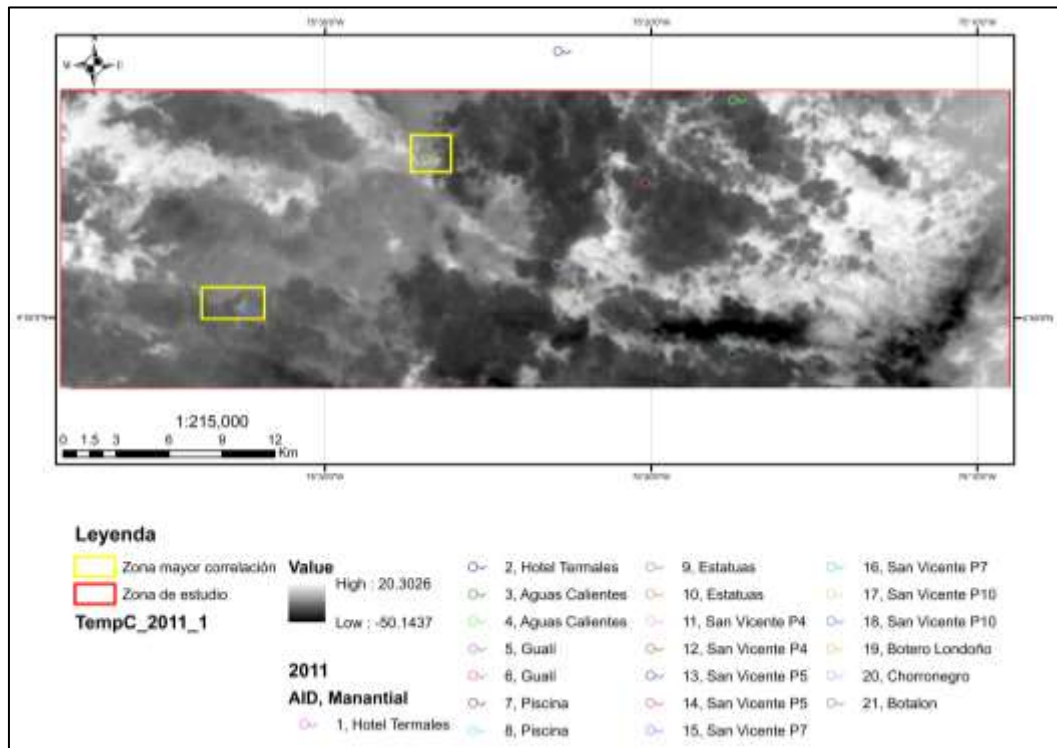


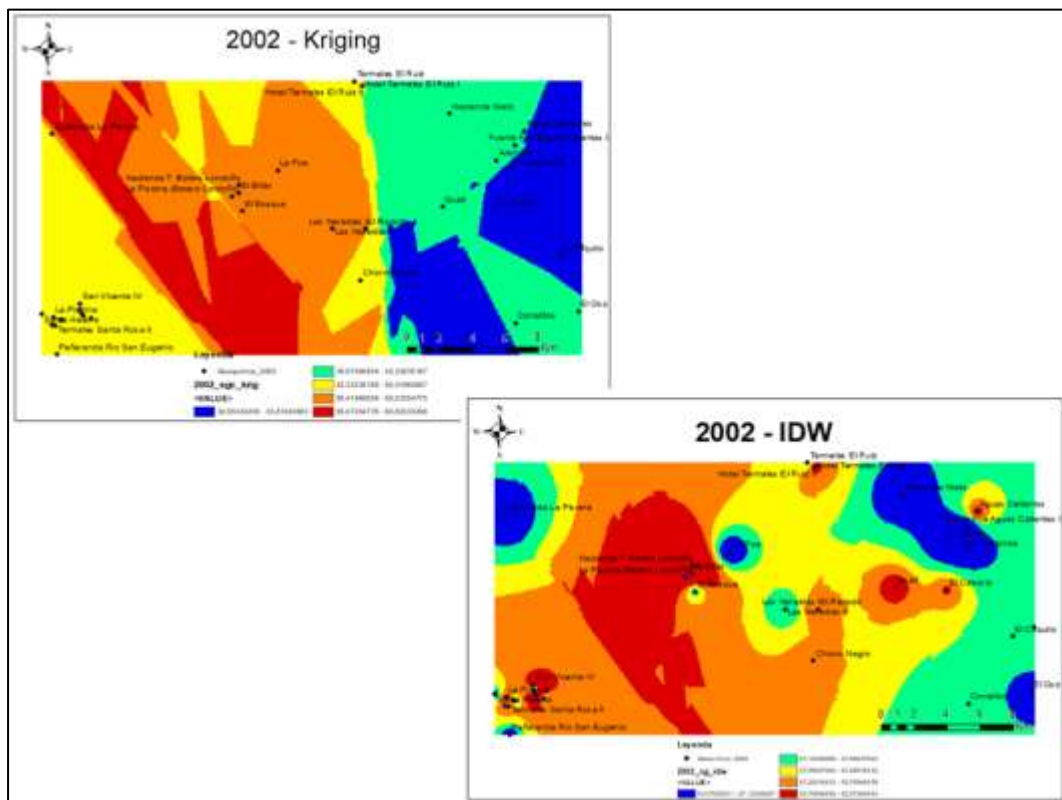
Figura 11. Zona de mayor correlación 2011



En la literatura se han documentado más de 100 manantiales cercanos al área de estudio, se logró obtener las coordenadas de localización de muchos de los manantiales, pues no se encontraban como datos abiertos. Las coordenadas fueron solicitadas múltiples veces al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales, las cuales nunca fueron atendidas, por tal motivo únicamente se emplearon los manantiales con localización con fuente abierta, sin embargo, los datos de temperaturas y pH fueron obtenidos en los boletines técnicos mensuales publicados en la página web del SGC.

Las zonas de interés para exploración fueron seleccionadas teniendo los datos de correlación obtenidos, y las interpolaciones realizadas (IDW y Kriging), siendo el método IDW, mostró mejor distribución de las anomalías térmicas. La Figura 12 muestra la comparación de disposición de anomalías térmicas entre los métodos de interpolación Kriging e IDW. Con las correlaciones halladas y las interpolaciones, se delimitaron tres áreas de interés: San Vicente – Santa Rosa, Botero Londoño – Chorro Negro, Chorro Negro – Botalón.

Figura 12. Kriging vs IDW



Zona de Interés San Vicente – Santa Rosa: Comprende los manantiales: San Vicente P4, P7, P11 y Los Helechos, geológicamente, según el SGC (2014), se compone en mayor parte de lavas andesíticas, cubiertas en algunos casos por aluviones, coluviones y/o derrubios de la cuenca del río Campoalegrito. Estructuralmente está asociado a la falla de Campoalegrito con tendencia NW-

SE (Figura 13). La Figura 14 contiene la zona de interés identificada, con los manantiales existentes para la misma.

Figura 13. Zona de interés San Vicente - Santa Rosa – Interpolación

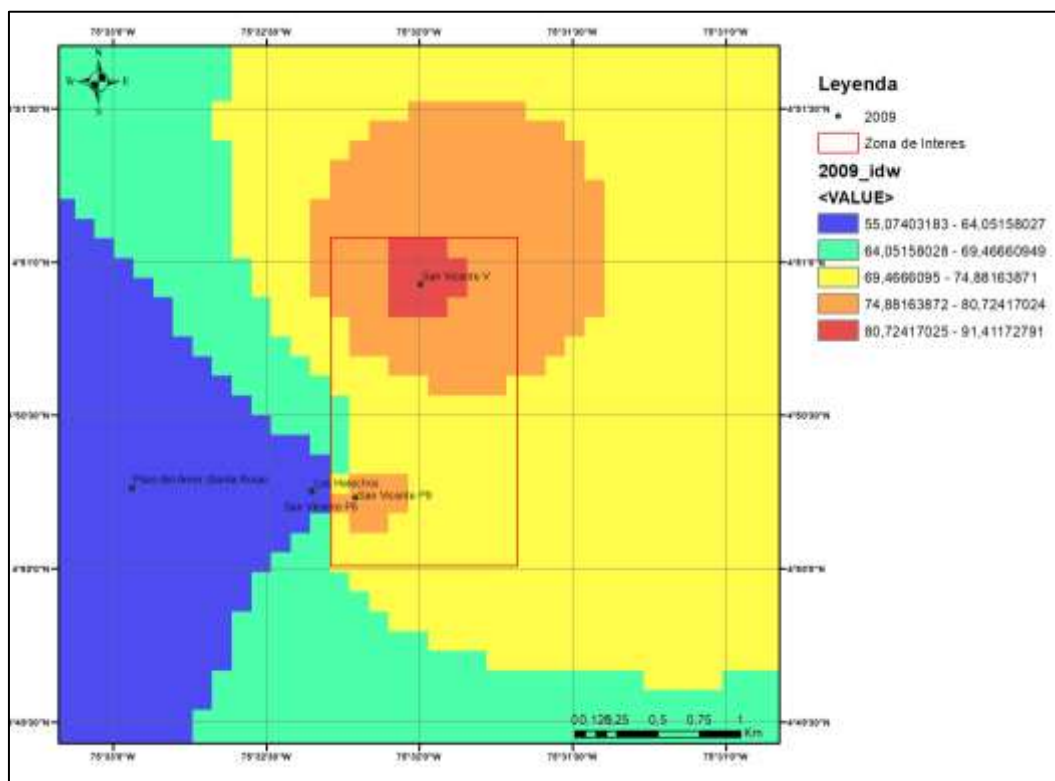
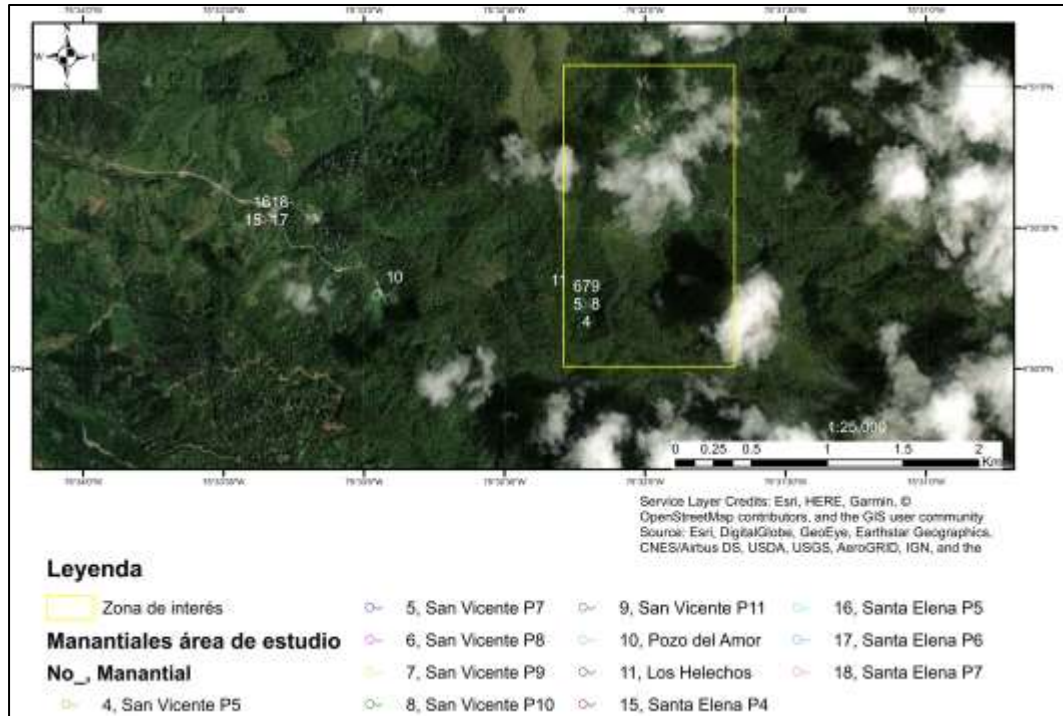


Figura 14. Manantiales zona de interes San Vicente - Santa Rosa



Zona de Interés Botero Londoño – Chorro Negro: esta zona (Figura 15), incluye a una de las zonas más estudiadas geotérmicamente hablando, la zona de Botero Londoño, donde el SGC (2014) ha reconocido la emergencia de esquistos del Complejo Cajamarca, pudiéndose asociar a la Falla Nereidas. La Figura 16, muestra la localización de los manantiales que fueron objeto de estudio y algunos volcanes ubicados en las cercanías, que sirven de referencia.

En la zona de Botero Londoño, como se manifiesta en Vega (2014), se encuentra la ignimbrita de Río Claro (Grand y Handszer 1989 en Vega 2014), como una serie de depósitos de flujo piroclástico, que se encuentran rellando un valle de basamento metamórfico (Complejo Cajamarca), sedimentario y antiguas coladas de lava, de composición predominantemente andesítica, mal seleccionado, el material lítico presenta cierta gradación lateral, los fragmentos de pómez y escoria volcánica no presentan organización en su deposición.

De acuerdo con Vega (2014), se encuentran tres sistemas de fallas, un sistema con orientación N-S, representando por la Falla San Jerónimo y Falla Laguna Baja, otro sistema con tendencia NW-SE, conformado por las Fallas Campoalegre, Río Claro, Nereidas, Villamaría-Termal y un sistema NE-SW representado por las Fallas Santa Rosa y Palestina (Hincapié, 2013 en Vega 2014). El Manantial Chorro Negro, según SGC (2014), emerge en los depósitos piroclásticos que suprayacen lavas andesíticas y probablemente a la falla del Río Claro.

Figura 15. Zona de Interés Botero-Londoño- Chorro Negro

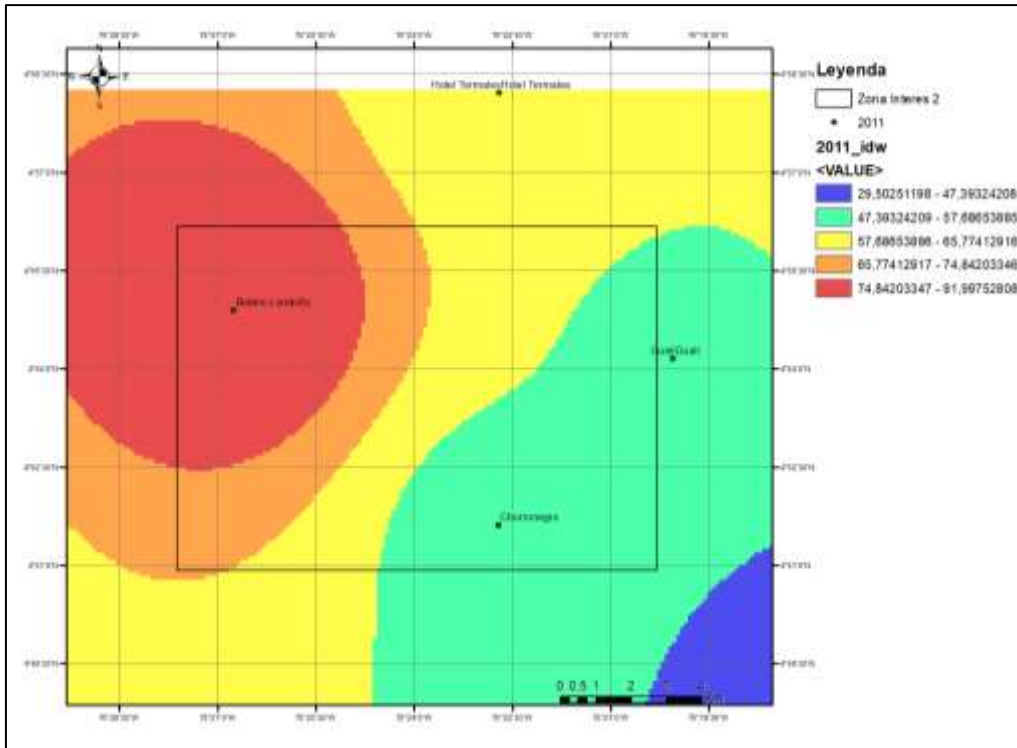


Figura 16. Localización manantiales zona de interés Botero Londoño - Chorro Negro



Zona de Interés Chorro Negro – Botalón: Para SGC(2014), el manantial Chorro Negro (Figura 17), está caracterizado por la surgencia en los depósitos piroclásticos que suprayacen las lavas andesíticas, probablemente asociado con la falla del Río Claro, en tanto la zona del manantial Botalón (Figura 17), de acuerdo con el SGC (2014), “ocurre en una zona de derrubios en las lavas, estos depósitos y flujos de lavas que cubren el Batolito del Bosque cerca a su contacto con el Complejo Metamórfico.

La localización de los manantiales que fueron tenidos en cuenta para realizar este estudio están contemplados en la Figura 18, acompañada de los volcanes cercanos de estas manifestaciones.

Figura 17. Zona de Interés Chorro Negro – Botalón

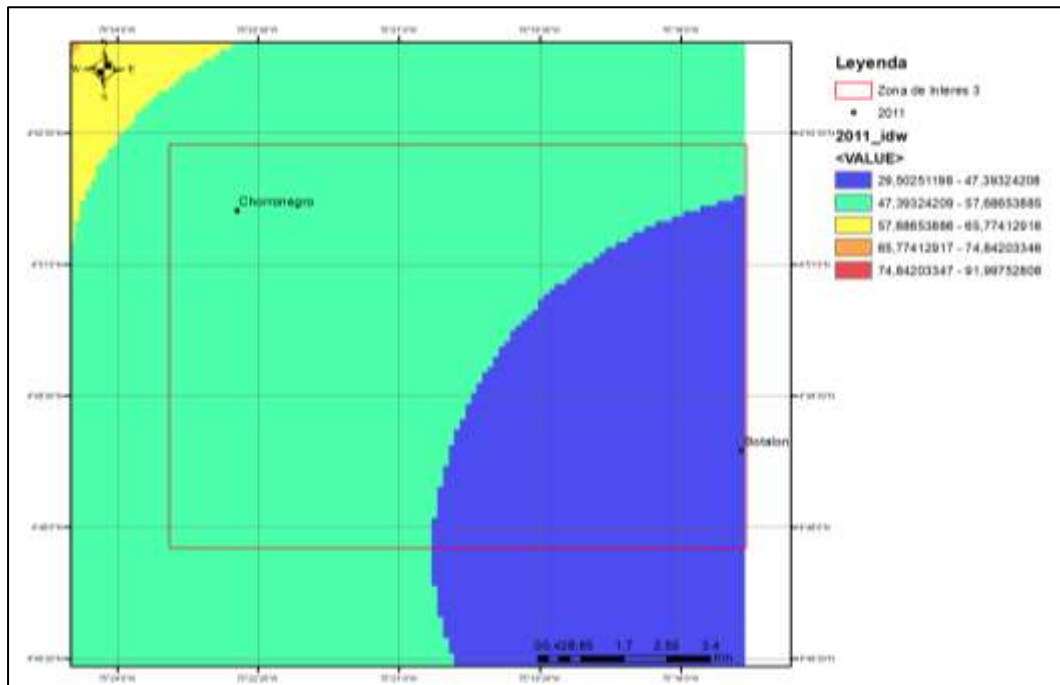
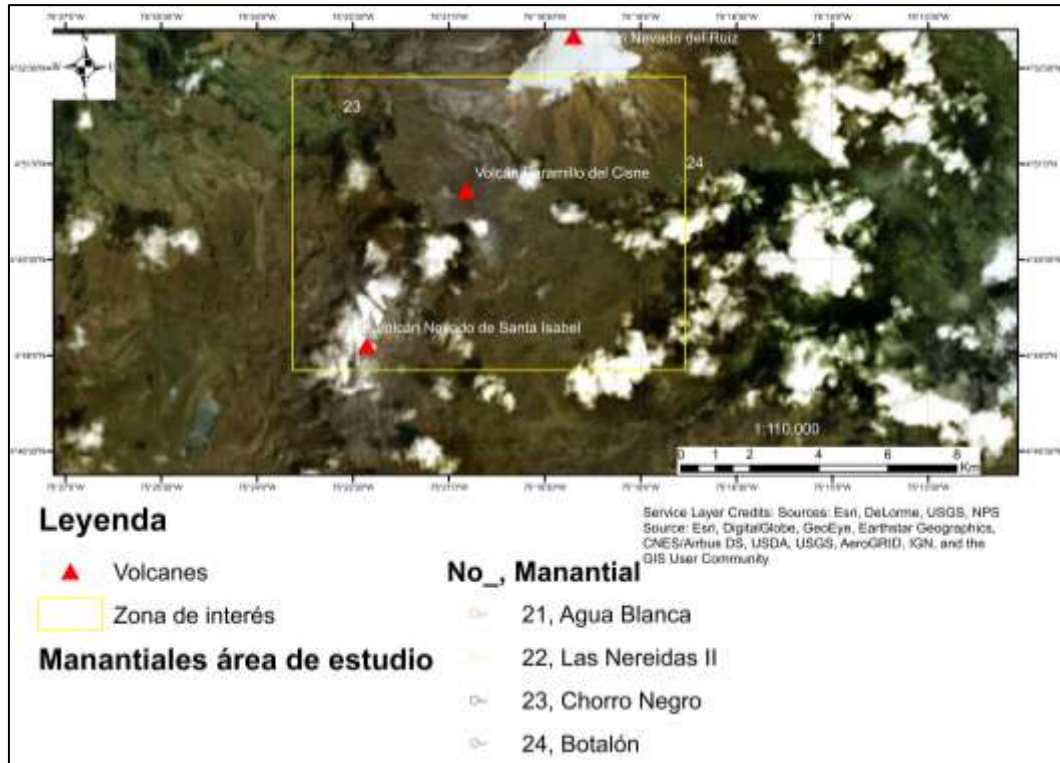


Figura 18. Localización manantiales zona de interés Chorro Negro - Botalón



10. Conclusiones

La determinación de las temperaturas con imágenes Landsat usando la banda termal, se logró obteniéndose temperaturas entre -143.798°C y 70.3428°C , sin embargo la temperatura mínima es muy baja y fue considerada como fuera de rango, sin embargo las temperaturas mínimas estuvieron alrededor de los -40°C , esta temperatura es aceptada dado que la zona de interés abarca zona del glaciar del Volcán Nevado del Ruíz, Volcán Nevado Santa Isabel, a pesar que este volcán no se incluyó como referente para estudios geotérmicos. Las temperaturas tan bajas pueden deberse por las condiciones del sensor y a la alta nubosidad de algunas de las zonas del área de interés.

La compilación de la información de estudios de campo de temperatura, se realizó satisfactoriamente, sin embargo se tuvieron limitantes con la compilación de las coordenadas de localización de algunos de los manantiales debido a que el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales no proporcionó esta información pese a varias peticiones.

La correlación de las temperaturas de estudios geoquímicos con las temperaturas calculadas con la banda termal y evaluar su nivel de concordancia, se encontró que la mayoría de las correlaciones (25%) fue correlación positiva muy baja seguida por correlación negativa muy baja (4 repeticiones). En este estudio no se encontraron correlaciones perfectas. Las correlaciones muy bajas y bajas pueden deberse a la alta densidad de vegetación del área de estudio.

Se identificaron tres zonas de interés geotérmico teniendo en cuenta los valores de correlación, donde se encontraron tres zonas de interés, San Vicente-Santa Rosa, Botero Londoño- Chorro Negro, Chorro Negro – Botalón, delimitadas como producto de las correlaciones de las temperaturas calculadas a partir de la banda termal y las temperaturas aportadas por estudios de campo, a partir de la consideración de Gehringer y Loksha (2012), que manifiestan que “los mejores campos geotérmicos se encuentran por lo general alrededor de áreas volcánicamente activas que a menudo se encuentran cerca de los límites de las placas tectónicas”.

Pudo demostrarse que, aunque las relaciones altas fueron pocas, debido posiblemente a la alta presencia de vegetación en la zona, la técnica puede ser aplicada y replicada en otras zonas, disminuyendo gastos y aumentando las probabilidades de éxito durante la exploración geotérmica.

11. Recomendaciones

Para este tipo de estudios es recomendable realizar actividades complementarias que permitan comprobar el grado de influencia de la vegetación al satélite, y conocer el grado de enmascaramiento, teniendo en cuenta la planteado por Nugriho y Dirgahayu (2015), se manifiesta la posibilidad de realizar estudios de Índice de Vegetación Mejorada (EVI, por siglas en inglés).

En futuros estudios sería pertinente aumentar la cantidad de manantiales, y refinar las localizaciones de los manantiales existentes, con el fin de aumentar la información confiable y comparable, así como emplear otros métodos estadísticos y evaluar el nivel de correlación no lineal, para verificar su nivel correlación.

En las zonas delimitadas como de interés geotérmico, es necesario adelantar estudios de campo, tales como geología, geofísica y refinar los estudios geoquímicos, en especial en la zona de San Vicente – Santa Rosa y Chorro Negro – Botalón, para detallar el reservorio geotérmico en caso de existir.

A. Anexo: Resumen de correlación por manantial

Manantial	Año	Temperatura tomada en campo	Temperatura Imagen satelital (calculada)	Correlación	
				Valor	Interpretación
Gualí	2008	61	-20.24	0.199519529	Correlación positiva muy baja
	2009	58	-25.04		
	2009	58	-3.52		
	2009	58	1.56		
	2011-1	56	-20.91		
	2013	59.2	13.27		
	2013	59.2	-17.64		
	2013	59.2	4		
	2013	59.2	-2.24		
	2013	59.2	-4.18		
Hacienda Termales Botero Londoño	1991	91.4	12.02	0.120972737	Correlación positiva muy baja
	1991	91.4	8.13		
	1996	92.13	15.77		
	2008	92	-25.75		
	2011	95	-2.78		
	2013	79.5	5.21		
	2013	79.5	-9.6		
	2013	79.5	4.61		
	2013	79.5	14.92		
	2013	79.5	11.03		
	2013	79.5	13.82		
	2016	48.25	-6.85		
	2016	48.25	-18.41		
	2016	48.25	-5.51		
	2016	48.25	11.59		
San Vicente P4	2008	59	-16.33	0.418174017	Correlación positiva moderada
	2009	61	-14.45		
	2009	61	12.52		
	2009	61	-4.82		
	2011-1	57	-10.19		
	2011-2	57.75	-10.19		
San Vicente P5	2008	84.5	-16.33	-0.028579573	Correlación negativa muy baja
	2009	82	-15.7		
	2009	82	14.92		
	2009	82	-3.52		
	2011-1	82	-10.19		
	2011-2	54.4	-10.19		
	2016	72	-7.53		
	2016	72	-14.63		
	2016	72	-6.85		
	2016	72	8.16		
2016	72	12.71			

Manantial	Año	Temperatura tomada en campo	Temperatura Imagen satelital (calculada)	Correlación	
				Valor	Interpretación
	2016	72	0.38		
San Vicente P7	2008	88	-22.26	-0.410706372	Correlación negativa Moderada
	2011-1	81	-10.19		
	2011-2	79.75	-10.19		
	2014	80	-12.14		
	2014	80	16.01		
	2014	80	10.6		
	2016	83	-7.53		
	2016	83	-14.63		
	2016	83	8.16		
	2016	83	12.71		
	2016	83	0.38		
San Vicente P8	2008	83.1	-22.26	-0.09635377	Correlación negativa muy baja
	2009	87	-14.45		
	2009	87	12.52		
	2009	87	-4.82		
	2009	82	-12.14		
	2014	82	16.01		
	2014	82	10.6		
	2016	83	-7.53		
	2016	83	-14.63		
	2016	83	8.16		
	2016	83	12.71		
2016	83	0.38			
San Vicente P9	2008	83.4	-22.26	-0.313139967	Correlación negativa baja
	2009	81	-14.45		
	2009	81	12.52		
	2009	81	4.82		
	2014	72	-12.14		
	2014	72	16.01		
	2014	72	10.6		
	2016	83	-7.53		
	2016	83	-14.63		
	2016	83	8.16		
	2016	83	12.71		
2016	83	0.38			
San Vicente P10	2008	77.2	-22.26	0.384070138	Correlación positiva baja
	2009	81	-14.45		
	2009	81	12.52		
	2009	81	-4.82		
	2011-1	69	-10.19		
	2011-2	74.5	-10.19		
	2016	83	-7.53		
	2016	83	-14.63		
	2016	83	-6.85		
	2016	83	8.16		
	2016	82	12.71		
2016	83	0.38			
San Vicente P11	2008	65.1	-22.26	-0.667545199	Correlación negativa
	2009	61	-14.45		

Manantial	Año	Temperatura tomada en campo	Temperatura Imagen satelital (calculada)	Correlación	
				Valor	Interpretación
	2009	61	12.52		moderada
	2009	61	-4.82		
Pozo del Amor	2008	56	-20.91	0.034158596	Correlación positiva muy baja
	2009	55	-10.19		
	2009	55	13.27		
	2009	55	2.32		
	2013	55.3	-2.88		
	2013	55.3	-12.44		
	2013	55.3	6.99		
	2013	55.3	8.75		
	2013	55.3	9.31		
	2013	55.3	16.55		
	2014	56.5	-10.43		
	2014	56.5	21.81		
2014	56.5	12.29			
Los Helechos	2008	57.3	-25.044	-0.774515826	Correlación negativa alta
	2009	56	-12.6		
	2009	56	13.82		
	2009	56	3.53		
Santa Elena P1	2008	63.8	-24.044	-0.252540477	Correlación negativa baja
	2009	64	-8.43		
	2009	64	18.68		
	2009	64	-2.88		
	2009	64	-11.64		
	2014	60	21.29		
	2014	60	9.8		
	2016	64	-6.85		
	2016	64	-15.37		
	2016	64	-6.84		
	2016	64	14.92		
	2016	64	12.15		
2016	64	-2.75			
Santa Elena P2	2008	56.3	-24.044	-0.14287191	Correlación negativa muy baja
	2009	56	-8.43		
	2009	56	18.68		
	2009	56	-2.88		
	2009	61	-11.64		
	2014	61	21.29		
	2014	61	9.8		
	2016	62.5	-6.85		
	2016	62.5	-15.37		
	2016	62.5	-6.84		
	2016	62.5	14.92		
	2016	62.5	12.15		
2016	62.5	-2.75			
Santa Elena P3	2008	54.2	-24.044	0.15564922	Correlación positiva muy baja
	2009	54	-8.43		
	2009	54	18.68		
	2009	54	-2.88		
	2009	60	-11.64		
	2014	60	21.29		

Manantial	Año	Temperatura tomada en campo	Temperatura Imagen satelital (calculada)	Correlación	
				Valor	Interpretación
	2014	60	9.8		
	2016	61.5	-6.85		
	2016	61.5	-15.37		
	2016	61.5	-6.84		
	2016	61.5	14.92		
	2016	61.5	12.15		
	2016	61.5	-2.75		
Santa Elena P4	2008	62.9	-25.044	-0.059914259	Correlación negativa muy baja
	2011-1	57	-10.19		
	2011-2	57.75	-10.19		
	2014	60	-11.64		
	2014	60	21.29		
	2014	60.	9.8		
	2016	61	-6.85		
	2016	61	-15.37		
	2016	61	-6.84		
	2016	61	14.92		
	2016	61	12.15		
Santa Elena P6	2009	61	-8.43	-0.3227155601	Correlación negativa baja
	2009	61	18.68		
	2009	61.01	-2.88		
Santa Elena P7	2009	66	-8.43	-0.3227155601	Correlación negativa baja
	2009	66	18.68		
	2009	66.01	-2.88		
Hotel Termales	2010-1	62.5	-40.71	-0.79056556	Correlación negativa alta
	2010-2	61.78	-7.27		
	2011-1	60.43	-13.82		
	2012	59.25	-2.87		
	2012	59.25	12.71		
	2012	59.25	-10.3		
	2012	59.25	14.92		
Aguas Calientes	2012	59.25	4.61	0.090891579	Correlación positiva muy baja
	1991	60.12	-0.6		
	1991	60.12	9.12		
	1996	58.87	18.51		
	1997	59.3	20.3		
	2009	59	-24.34		
	2009	59	0.31		
	2009	59	4.61		
	2010-1	59.33	-6.7		
	2011-1	58.7	-15.7		
	2011-2	58.31	0.93		
	2012	58.75	0.93		
	2012	58.75	4		
	2012	58.75	-9.6		
	2012	58.75	19.73		
	2012	58.75	4		
	2013	58.4	16.55		
2013	58.4	-13.5			

Manantial	Año	Temperatura tomada en campo	Temperatura Imagen satelital (calculada)	Correlación	
				Valor	Interpretación
Manantial	2013	58.4	-4.84	0.702539914	Correlación positiva alta
	2013	58.4	-2.87		
	2013	58.4	0.93		
	2013	58.4	21.3		
	2014	60.2	-10		
	2014	60.2	14.37		
	2014	60.2	20.21		
	2014	59.93	-6.18		
	2014	59.93	-13.98		
	2014	59.93	-1.59		
	2014	59.93	0.94		
	2014	59.93	18.15		
	2014	59.93	12.35		
Agua Blanca	1991	33.6	11.06	0.702539914	Correlación positiva alta
	1991	33.6	-14.44		
	1996	32.7	17.15		
	1997	32.2	18.06		
	1997	32.2	-13.82		
	2011	32	-15.07		
	2013	29.1	9.81		
	2013	29.1	-7.54		
	2013	29.1	-5.51		
	2013	29.1	10.46		
	2013	29.1	0.93		
Las Nereidas II	2013	25.1	12.55	-0.115725077	Correlación negativa muy baja
	2013	25.1	-15.77		
	2013	25.1	-3.53		
	2013	25.1	10.46		
	2013	25.1	7.58		
	2016	52.5	18.16		
	2016	52.5	-6.85		
	2016	52.5	-18.41		
	2016	52.5	5.21		
	2016	52.5	17.62		
	2016	52.5	12.71		
Chorro Negro	1991	50.6	12.02	-0.442659054	Correlación negativa moderada
	1991	50.6	12.02		
	1996	52.05	9.61		
	1997	52.45	20.74		
	1997	52.45	8.13		
	2011	53	-10.79		
Botalón	1996	28.1	12.02	-0.866965025	Correlación negativa alta

Referencias bibliográficas

- Alfaro, C., Aguirre, A., & Jaramillo, L. (2002). *Inventario de Fuentes Termales en el Parque Nacional Natural de Los Nevados*. Ingeominas (hoy Servicio Geológico Colombiano). Recuperado de <http://adminmiig.sgc.gov.co/Lists/RecursosSGC/DispForm.aspx?ID=15132>
- Blanco-Arrué B., Carmona-Herrera N., Abarca del Río R., Fustos-Toribio I., Orrego R. (Sin fecha). Estudio preliminar de exploración geotermal en zonas de la cuenca del Bío-bío. Recuperado de: https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/DataFiles/14127_pp_568_570.pdf
- Calzada-Iglesias, E.O. (2016). *Aplicación de Percepción Remota para el Estudio de Áreas con un Potencial Geotérmico, La Soledad (Jalisco) y Los Negritos (Michoacán)*. [Tesis de Maestría]. Centro de Investigación en Geografía y Geomática "Ing. Jorge L. Tamayo", CentroGeo, Ciudad de México. Recuperado de: <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/20>
- Capelo, S.A. (2017). *Análisis de la factibilidad técnica del uso de la energía geotérmica en la industria florícola*. [Trabajo de titulación]. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química, Quito. Recuperado de: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/12913/1/T-UCE-0017-0054-2017.pdf>
- Chan H., Chang C., Dao P.D. (2017). Geothermal Anomaly Mapping Using Landsat ETM+ Data in Ilan Plain, Northeastern Taiwan. *Pure App. Geophys.*
- Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), (2016). Geotermia Desafíos, Mitos y Realidades. Recuperado de: http://www.chec.com.co/Portals/0/Ad_espectador_CHEC_geotermia_v03-01%20copia.pdf
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio* (3ª edición). Barcelona, Ariel.
- Congreso de la República (Colombia) (13 de mayo de 2014). Ley 1715 de 2014. *Diario Oficial*, No. 49.150. Recuperado de: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- Gehringer, M., & Loksha, V. (2012). *Manual de Geotermia: Cómo planificar y financiar la generación de electricidad*. Informe Técnico 002/12. Washington D.C.: Banco Internacional para la Reconstrucción y el Desarrollo - Programa de Asistencia para la Gestión del Sector Energético (ESMAP). Recuperado de: https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP_GEOTHERMAL_Spanish_book_Optimized.pdf
- Ferrer H. P., Bate E., Guerrero D.R., Ferrer A.P. (1986). LANDSAT Assited Geostructural Analysis of the Bacon-Manito Geothermal Field, Southeastern Luzon, Philippines. *Geothermal Resources Council BULLETIN* May 1986, 8-14.
- Fridriksson T., & Ármannsson H. (2007). Application of geochemistry in geothermal resource assessments. *Short course on Geothermal*

- Development in Central America- Resource Assessment and Environmental Management* (pp. 1-8). San Salvador: UNU-GTP and LaGeo. Recuperado de: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-04-04.pdf>
- Hernández, J.A., Cardona J.F., & Vega-Salazar, E.J. (2016) Colombian Geothermal Energy Development: Technical and Economic Factors Favoring Foreign Investment. *GRC Transactions*, 40, 3-8.
- Hernández-Sampieri R., Fernández-Collado C., Baptista-Lucio M.P. (2010). Metodología de la Investigación. Quinta Edición. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Hantson, S., Chuvieco, E., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., Cristobal, J., Peces, J.J., & Tejeiro, J.A. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección* 36, 51-61.
- Hoyos, S., Franco, C.J., & Dyrer, I. (2017). Integración de fuentes no convencionales de energía renovable al mercado eléctrico y su impacto sobre el precio. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 115-146, <https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.5>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (s.f.). *Imágenes del territorio*. México. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/default.aspx>
- Jaimes, J. (2016). *Análisis de introducción sostenible de energías alternativas en Colombia*. [Tesis de Especialización]. Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ciencias Económicas, Especialización en Alta Gerencia, Bogotá. Recuperado de: <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/15946/1/Jaimes%20Rubiana%20Jonathan%202016.pdf>
- Jimenez-Muños J.C., Cristóbal J., Sobrino J.A., Soria G., Ninyerola M., Pons X., (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval From Landsat Thermal-Infrared Data. Recuperado de: https://www.uv.es/ucg/articulos/2009/Publications_2009_1.pdf
- Karki S., Kobs Nawotniak S., Bottenberge H.C., McCurry M., Welhan J., (2014), Determination of geothermal anomalies through multivariate regression of background variables at Yellowstone National Park using Landsat 5 TM Thermal Band Data. *GRC Transactions*, Vol. 38, 2014.
- Ke-sheng S., Ming-yuan H. (2010). Application of Remote Sensing Technology in Geothermal Exploration: a Case Study of Taizhou City in Jiangsu Province. *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29 April 2010* (pp. 1-4).
- Landsat (2018). Manual de usuario. Recuperado de: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/LSDS-1927_L7_Data_Users_Handbook.pdf
- Landsat (2017). *Landsat Missions: About Landsat*. U.S. Geological Survey Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/about-landsat>

- Marini, L. (2000). *Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy* [elearning repository]. The Geothermal Communities (GEOCOM) project. Recuperado de: <http://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/2.3.chile.pdf>
- Mengistu D., Y, Tesfaw H., B., Atnafu M., A., Kidane T. (2019). Detection of geothermal anomalies using Landsat 8 TIRS data in Tulu Moye geothermal prospect, Main Ethiopian Rift. *Elsevier Hearth Obs Geoinformation* 74 (2019) 16-26.
- Mboin, I. (2011). Application of Landsat TM Satellite Imagery to Map Geothermal Resources and Land Cover: Case Study of Silali Prospect. *GRC Transaction*, 35, 911-915.
- Mutua. A.F., Kuehn, F., Lopeyok, T., Mutonga, M., Ochmann, N. (2013). High Resolution airborne thermal infrared remote sensing study, Silali Geothermal Prospect, Kenya. Short course VIII on Exploration for Geothermal Resources.
- Negroho U.C., Dirgahayu D.D.(2015). Identification of land surface temperature distribution of geothermal area in Ungaran Mount by using Landsat 8 imagery. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences Vol 12 No.2 December 2015* 143-150.
- Ochieng L. (2013). Overview of Geothermal surface exploration methods. *Short course VIII on Exploration for Geothermal Resources* (pp. 1-13). Lake Bogoria: UNU-GTP, GDC and KenGen.
- Paredes-Hernández CU, Salinas-Castillo WE, Martinez-Becerra X, Jimenez-Hernández SB. (2013). Evaluación y comparación de métodos de interpolación determinísticos y probabilísticos para la generación de modelos digitales de elevación. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n82/n82a9.pdf>
- Pastor, M.S. (2010). Application of Thermal Remote Sensing for Geothermal Mapping, Lake Naivasha, Kenya. *Proceeding World Geothermal Congress* (pp. 1-3). Bali: International Geothermal Association (IGA).
- Ramos, M.E. (2017). Tratamientos estadísticos en imágenes de satélite, realces y mejoras visuales, realces radio métrico, espacial y espectral. *Apthapi* 3(2), 593-613.
- Rayo L. P (2012). Evolución geoquímica y térmica del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional. Recuperado de: http://www.bdigital.unal.edu.co/8181/1/194723_2012_1.pdf
- Saldivia, M, (2018). Análisis de Legislación comparada sobre energía geotérmica. Informe CEGA.
- Santa Rosa de Cabal Risaralda (sin fecha). Recuperado de: http://www.santarosadecabal-risaralda.gov.co/informacion_general.shtml
- Savage S. (2009). Evaluating the use of Landsat imagery for monitoring geothermal heat flow in Yellowstone National Park. Land Resources and Environmental Sciences Montana State University. CESU task agreement number: J1580050584
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) (sin fecha). Generalidades Volcán Nevado del Ruiz. Recuperado de:

- <https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanNevadoRuiz/Paginas/generalidades-volcan-nevado-ruiz.aspx>
- Servicio Geológico Colombiano (SGC) (2014). Recuperado de: <http://hidrotermales.sgc.gov.co/invtermalesProd/>
- Spadacini, C., Centeneri, L., Danieli, M., Rizzi, D., & Xodo, L. (2017). Explotación geotérmica con la turbina de flujo orgánico con salida radial Exergy Radial Outflow Turbine. *Revista Geotermia*, 30(1), 18-26.
- Suárez-Ibujes M.O. (2011). Coeficiente de Correlación de Karl Pearson. Recuperado de: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/766>
- Vega-Salazar, E.J. (2014). Aporte al Modelo Geológico del Valle de la Nereidas.[Tesis pregrado] Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas, Programa de Geología.
- Wright P.M., Lira H., H., Ramsey, D.R. (1990), Interpretation of Landsat Thematic mapper satellite imagery at Los Azufres geothermal field, Michoacan, Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions* Vol. 14, Part II, August 1990.