

Aplicación de tecnologías de la información geográfica para el estudio de áreas con potencial geotérmico: Caso de estudio Complejo Volcánico Planchón Peteroa (CVPP), Chile-Argentina

Nicolás José Porras Plata

Trabajo de grado, bajo la modalidad de tesis de grado para optar por el título de Geólogo

Director

Leily Johanna Candela Becerra. Geóloga Esp.

Codirector

César Augusto Suárez Herrera. Geólogo Esp.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mi familia, por contribuir en cada paso hasta el día de hoy. Por mi padre que me demostró la transparencia en cada momento, a mi madre ser incondicional en cualquier momento.

Agradecimientos

La formación de un ser humano se compone de las experiencias vividas, tanto personales como académicas y de todo ámbito. Es por eso que tengo el mayor sentido de agradecimiento con ellos.

Quiero hacer un reconocimiento especial a Leily Candela y César Suárez, son quienes admiro por las capacidades como profesionales y valores como personas, fue grato haber compartido esta experiencia académica dirigida por ustedes. Un agradecimiento Mario García y Hernando Mendoza, docentes que durante mi trayectoria en la academia enseñaron valores en la investigación que han marcado mi pensamiento.

A todos mis amigos y compañeros durante mi estancia en la UIS, las cuales han contribuido de su manera, particularmente a Sergio, quien con su capacidad intelectual, a demás compartimos en varias ocasiones conceptos, y perspectivas que han aportado en mi formación. También quisiera agradecer a Carlos, Eberth y Luifer, con quienes compartí momentos gratificantes y enseñanzas durante esta etapa, de igual forma a Gabriel y Juan Pablo, quienes demostraron el aprecio a la academia.

Infinitamente agradecido con mi familia, por el esfuerzo que día a día dieron, porque sin tal esfuerzo constante, nada de esto sería posible. A mis hermanos por ser pilares fundamentales en mi desarrollo. con personas cercanas, Juan Carlos, Pedro Luis, Leonardo gracias por ser incondicionales en todo momento y de la misma forma se caracterizan por su lealtad. De la misma forma quiero expresar mi gratitud a Catalina, quien me apoyó en cada parte del proceso a demás compartí momentos gratificantes y enseñanzas.

Finalmente, a todos relacionados con la Universidad Industrial de Santander, porque gracias a ellos y su compromiso, se construye día a día educación de alta calidad, la cual me siento afortunado de gozar.

Tabla de Contenido

Introducción	16
Planteamiento del problema	17
Justificación	20
1. Objetivos	22
2. Estado del arte	23
2.1. Zona Volcánica Sur	25
2.2. Geología Regional	27
2.3. Área de Estudio: Complejo Volcánico Planchón Peteroa	28
2.3.1. Tectónica	28
2.3.2. Estratigrafía	30
2.3.3. Sistema Geotérmico	32
3. Marco Teórico	34
3.1. Marco geológico de zonas con potencial geotérmico	34
3.2. Recurso geotérmico	36
3.2.1. Recurso geotérmico en Latinoamérica	37
3.3. Fundamentos de Teledetección	39

3.3.1. Principios físicos de teledetección	39
3.3.2. Espectro Electromagnético	40
3.3.3. Radiación de un Cuerpo Negro	42
3.4. Tipos de Sensores	42
3.4.1. Sensores Pasivos	43
3.4.2. Sensores Activos	43
3.5. Tipos de Resolución de Sensores Remotos	43
3.6. Productos Satelitales	44
3.6.1. Landsat 7	45
3.6.2. Landsat 9	45
3.6.3. ASTER	45
3.6.4. Sentinel-2	45
3.6.5. Sentinel-1	46
3.7. Caracterización de Anomalías Térmicas	46
3.8. Mapeo Espectral de Minerales	48
3.9. Extracción de lineamientos mediante Procesamiento Digital de Imagen (PDI)	49
3.10. Métodos de Evaluación Multicriterio	50
3.10.1. Modelamiento basado en SIG	51
3.10.1.1. Modelos de índice	51
3.10.1.2. Modelos de regresión	52
3.10.1.3. Modelos de proceso	52

3.10.1.4. Modelos probabilísticos	53
4. Metodología	54
4.1. Revisión de estado del arte y construcción de la base de datos geográfica	56
4.2. Preprocesamiento	58
4.2.1. Imágenes de Radar: Sentinel-1	59
4.2.2. Imágenes ópticas: ASTERL1T	60
4.2.3. Imágenes térmicas: ASTER08	62
4.3. Procesamiento	63
4.3.1. Imágenes de Radar: Sentinel-1	63
4.3.2. Imágenes ópticas: ASTERL1T	64
4.3.3. Imágenes térmicas: ASTER08	65
4.4. Análisis Multicriterio	67
4.4.1. Evidencias de Temperatura	71
4.4.2. Evidencias de flujo hidrotermal	73
4.4.3. Evidencias de permeabilidad	74
4.4.4. Manifestaciones Termales	75
4.4.5. Evidencias y Pesos	76
5. Resultados	77
5.1. Temperatura Superficial	77
5.2. Lineamientos Estructurales	81

APLICACIÓN DE TIG PARA EL ESTUDIO DE ZONAS CON POTENCIAL GEOTÉRMICO	8
5.3. Mapeo Mineralógico	83
5.4. Modelo de análisis espacial para delimitar zonas con potencial geotérmico	84
6. Análisis de Resultados	86
7. Conclusiones	90
8. Recomendaciones	92
Referencias Bibliográficas	93
Apéndices	106

Lista de Figuras

Figura 1.	Mapa esquemático de las cuatro zonas volcánicas activas en Sur América.	24
Figura 2.	Vista de mapa de la la sección entre 45°S hasta 15°S de la cadena montañosa de los Andes	26
Figura 3.	a. Localización regional del complejo volcánico Planchón-Peteroa	29
Figura 4.	Mapa geológico del Complejo Volcánico Planchón Peteroa, tomado y modificado de Vigide et al., 2020	30
Figura 5.	Modelo conceptual del subsuelo, del área relacionada con el Complejo Volcánico Planchón-Peteroa.	33
Figura 6.	Clasificación de sistemas geotérmicos con potencial económico tomado y modificado de Elders y Moore, 2016	34
Figura 7.	Clasificación de sistemas geotérmicos según su régimen tectónico, tomado y modificado de Elders y Moore, 2016	35
Figura 8.	Localización de campos en proyecto de explotación para Latinoamérica y potencial para la exploración de energía geotérmica en Sur américa en relación con el régimen tectónico, modificado de Stern, 2004.	38
Figura 9.	Onda electromagnética	40
Figura 10.	Espectro electromagnético.	41
Figura 11.	Ley de desplazamiento de Wien.	42

Figura 12.	a. aguas termales b. geysers c. fumarolas d. pozos de lodo o mudpools tomado de (Haselwimmer & Prakash, 2013)	47
Figura 13.	Alteración de minerales y su estabilidad térmica asociados a sistemas geotérmicos, tomado y modificado de van der Meer et al., 2014	48
Figura 14.	imagen a. es un producto satelital Sentinel-1 GRD en valores de retrodispersión b. es el producto filtrado mediante filtro convolucional NE-SW, resaltando lineamientos en esa dirección.	51
Figura 15.	Diagrama de flujo de la metodología de aplicación para crear un Modelo de índice, tomado y traducido de Gupta, 2018	52
Figura 16.	Diagrama de flujo de la metodología del proyecto	54
Figura 17.	Matrices de convolución Sobel, tomado de Ghazi, 2013	63
Figura 18.	Firmas espectrales de minerales de alteración a. Grupo óxidos de hierro b. Grupo alteración argilica c. minerales illita (alteración fílica) y muscovita como indicador de ambientes magmáticos hidrotermales d. grupo de alteración propilítica, tomado de USGS	66
Figura 19.	Flujo de trabajo para delimitar y definir zonas de potencial geotérmico	70
Figura 20.	Capas de evidencia utilizadas en el modelo	72
Figura 21.	Mapas de temperatura superficial en °C. a. Banda promedio con 68 imágenes, suma de las imagenes resaltadas en rojo y azul (Apéndice F) b. banda promedio con 18 imágenes c. banda promedio de 50 imágenes	78

APLICACIÓN DE TIG PARA EL ESTUDIO DE ZONAS CON POTENCIAL GEOTÉRMICO	11
Figura 22. Histogramas de las capas de temperatura. n=numero de píxeles	80
Figura 23. Distribución de rumbos de los lineamientos representados por diagramas de rosas a. lineamientos menores b. lineamientos mayores.	81
Figura 24. Lineamientos menores y mayores caracterizados en el área de estudio	82
Figura 25. Minerales indicadores de potencial geotérmico detectados por Spectral Angle Mapper (SAM)	83
Figura 26. Modelo de análisis espacial para delimitar zonas con potencial geotérmico.	85

Lista de Tablas

Tabla 1.	Clasificación de bandas ubicadas entre 0.4 μm hasta longitudes de onda del microondas, VIS, NIR, SWIR y parte del MIR se encuentran en el espectro reflectivo, TIR y parte del MIR en el espectro emisorio (Meneses & Almeida, 2012).	41
Tabla 2.	Características técnicas (Resolución espectral y espacial) de productos satelitales	44
Tabla 3.	Tabla de comparación entre zonas volcánicas con potencial geotérmico.	58
Tabla 4.	Información general de los productos ASTERL1T. CC % = Porcentaje de nubosidad, DN = Adquirida de día o de noche	61
Tabla 5.	Umbrales de clasificación de materiales a enmascarar	62
Tabla 6.	Pesos aplicados a las capas de evidencia, los valores fueron tomados como referencia desde el trabajo de Lindsey et al., 2021 y adaptados al modelo.	77
Tabla 7.	Estadística para los pixeles de las bandas promedio n=numero de pixeles, P90= Percentil 90, P10= Percentil 10	79
Tabla 8.	Estadística de datos de lineamientos, donde l = longitud del lineamiento en metros y n = numero de lineamientos	82
Tabla 9.	Pixeles de minerales indicadores clasificados por el algoritmo SAM	84
Tabla 10.	Área de los valores del modelo.	85

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Conceptos de sensores remotos	106
Apéndice B. Radiación de un Cuerpo Negro	107
Apéndice C. Emisividad NEM y Algoritmo TES propuesto por Gillespie et al., 1998	107
Apéndice D. Conceptos de sensores remotos	109
Apéndice E. Obtener °C a partir de DN para múltiples imágenes ASTER08	111
Apéndice F. Productos de temperatura superficial involucrados	115
Apéndice G. Anomalías Térmicas MODVOLC	117

Resumen

Título: Aplicación de tecnologías de la información geográfica para el estudio de áreas con potencial geotérmico: Caso de estudio Complejo Volcánico Planchón Peteroa (CVPP), Chile-Argentina *

Autor: Nicolás José Porras Plata **

Palabras Clave: Potencial geotérmico, Sensores remotos, Sistemas de Información Geográfica, Complejo Volcánico Planchón-Peteroa.

Descripción: En el proyecto de investigación se propone una metodología que permite evaluar zonas con potencial geotérmico a partir de información geográfica en conjunto con capas derivadas de productos satelitales, se presenta como caso de estudio el Complejo Volcánico Planchón-Peteroa en un área aproximada de 1555Km^2 sobre el límite administrativo de Chile y Argentina. Agencias espaciales internacionales como NASA o ESA promueven la exploración de datos de índole satelital, haciendo posible adquirir de manera gratuita productos como ASTER08, Sentinel-1 GRD, ASTERL1T. Estos fueron preprocesados y procesados, según estándares propuestos en estudios previos, para generar capas de temperatura superficial (LST), la extracción de lineamientos estructurales y análisis morfométrico e identificación de minerales indicadores localizados en ambientes geotérmicos. Capas de información geográfica como geología, fallas, manifestaciones termales y lagos fueron transformados mediante cálculos de proximidad en entornos SIG para crear capas de evidencia adicionales. Estas capas de evidencia soportan la existencia de un modelo de sistema geotérmico de estratovolcán reciente, donde debe encontrarse la influencia geológica de temperatura, flujo y permeabilidad, brindando una posible relación espacial. Este set de datos fue combinado mediante la estructura de un modelo de índice para producir el modelo de análisis espacial para delimitar zonas con potencial geotérmico.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Esp. Leily Johanna Candela Becerra. Codirector: Esp. César Augusto Suárez Herrera.

Abstract

Title: Application of Geographic Information Technologies for the Study of Areas with Geothermal Potential: Case Study of the Planchón Peteroa Volcanic Complex (CVPP) in Chile-Argentina *

Author: Nicolás José Porras Plata **

Keywords: Geothermal Potential, Remote Sensing, Geographic Information Systems, Planchón-Peteroa Volcanic Complex.

Description: The research project proposes a methodology that allows the evaluation of areas with geothermal potential using geographic information in conjunction with layers derived from satellite products. The Planchón-Peteroa Volcanic Complex is presented as a case study, covering an approximate area of 1555 Km^2 along the administrative boundary of Chile and Argentina. International space agencies such as NASA or ESA promote the exploration of satellite data, enabling the acquisition of free products such as ASTER08, Sentinel-1 GRD, and ASTERL1T. These products were preprocessed and processed according to standards proposed in previous studies to generate layers of Land Surface Temperature (LST), extraction of structural lineaments, morphometric analysis, and identification of indicator minerals located in geothermal environments. Geographic information layers such as geology, faults, thermal manifestations, and lakes were transformed using proximity calculations in GIS environments to create additional evidence layers. These evidence layers support the existence of a recent stratovolcano geothermal system model, where the geological influence of temperature, flow, and permeability must be present, providing a possible spatial relationship. This dataset was combined using an index model structure to produce the spatial analysis model to delineate areas with geothermal potential.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Esp. Leily Johanna Candela Becerra. Codirector: Esp. César Augusto Suárez Herrera.

Introducción

La continua emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera han desencadenado un aumento gradual de la temperatura terrestre lo cual tiene unas graves consecuencias sobre recursos esenciales para nuestro desarrollo. Una de las soluciones parciales para la mitigación del cambio climático es construir planes energéticos diversificados en los que las energías renovables como la eólica, hidroeléctrica y geotérmica tengan un rol protagonista debido a la necesidad de transitar hacia nuevas fuentes de energías limpias que tienen benéficos impactos desde lo social, económico y ambiental.

Los recursos geotérmicos son una de estas fuentes de energías limpias, que son de gran importancia debido a su abundancia y diversidad genética (Goff and Janik, 2000). Los reservorios de alta temperatura están asociados a zonas con contextos geodinámicos de subducción como arcos volcánicos en donde debido a su configuración geológica es posible observar indicadores superficiales de altos diferenciales de temperatura y circulación de fluidos hidrotermales que generan anomalías térmicas de baja temperatura y alteraciones hidrotermales en los materiales de la superficie (Browne, 1970, 1978; Stern, 2004). Estas variables de superficie pueden ser caracterizadas y cuantificadas mediante el procesamiento digital de información satelital de diferentes sensores satelitales tanto ópticos como de radar, e integrada y analizada en relación con otras fuentes de información para identificar áreas con posible potencial geotérmico (Stern, 2004).

En este documento se presenta la investigación dada en el área que comprende al Complejo

Volcánico Planchón Peteroa (CVPP) y zonas aledañas, orientado al desarrollo y aplicación de metodologías basadas en el uso de tecnologías de la información geográfica para identificar áreas con potencial geotérmico, a partir de la construcción y validación de múltiples variables geoambientales derivadas del procesamiento de imágenes satelitales. La elaboración del proyecto se constituye de 5 pasos: I) revisión bibliográfica, II) Construcción de un marco teórico para definir las bases conceptuales necesarias para la aplicación de procedimientos en imágenes ópticas, térmicas y de radar. III) Aplicación de metodologías de procesamiento de imagen e integración SIG. IV) Análisis de resultados, y V) Conclusiones y recomendaciones para futuros estudios relacionados con el uso de tecnologías satelitales en la exploración y estudio de áreas con potencial geotérmico.

Planteamiento del problema

El uso de las fuentes de energía no renovable y la emisión desmesurada de CO₂ a la atmósfera ha ocasionado en las últimas décadas un grave impacto sobre ecosistemas esenciales y el medio ambiente en general. En el marco de los proyectos de transición energética, las potencias mundiales han constituido como objetivo al 2050 (Internacional Energy Agency, 2021) descarbonizar el planeta adoptando fuentes de energía con poca o nula emisión de CO₂ y tecnologías que incluyan la captura de CO₂ y su posterior aprovechamiento.

Dentro de los planes de transición que tiene Colombia se mencionan las hojas de ruta del hidrógeno (Ministerio de Minas y Energía, 2021), la Estrategia Climática de Largo Plazo E2050 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), la cual es una política de estado enmarcada en los objetivos plasmados en el Acuerdo de París (Ministerio de Ambiente de Colombia,

2020), y la adopción de tecnologías para el aprovechamiento máximo de fuentes de energía renovables como la geotérmica, hidráulica, solar y eólica (Bataille et al., 2016; Vaillancourt et al., 2017; Rissman et al., 2020).

En el caso de los países en vía de desarrollo como los de América Latina, gran parte de la energía renovable se ha venido obteniendo de fuentes hidroeléctricas y eólicas, sin embargo, países como Perú, Argentina, Chile, Costa Rica, El Salvador, Guatemala y México, vienen implementando hace un par de años políticas orientadas al uso y aprovechamiento de fuentes de energía geotérmica (Guzmán et al., 2011; Alexander Ritcher, 2019; Hanson, 2020).

Uno de los principales desafíos que tiene la exploración y explotación del recurso geotérmico en países en vía de desarrollo, es el alto costo que involucra dado que requiere integrar métodos geoquímicos, geofísicos, geológicos e hidrogeológicos en zonas extensas o de difícil acceso (Macharia et al., 2017). Sin embargo, en los últimos años se han venido implementando otras tecnologías que si bien, no remplazan estos métodos de prospección del recurso, permiten estudiar, proveer información preliminar, entender y explorar las áreas de interés con costos menos elevados (van der Meer et al., 2014; Macharia et al., 2017; Lindsey et al., 2021). En este sentido, este proyecto está orientado a abordar la utilidad de las tecnologías de la información geográfica para el estudio de posibles campos geotérmicos a partir del uso de diferentes recursos satelitales gratuitos y el análisis de diferentes variables temáticas espaciales. Este proyecto tiene como fin mostrar como la integración de diferentes tipos de teledetección, la construcción de variables geoambien-

tales y su posterior análisis multivariable pueden ser utilizados para definir y delimitar zonas con características óptimas para albergar este recurso y apoyar mediante métodos indirectos estudios de exploración geotérmica. Para ello, se hará uso de tecnologías satelitales que incluyen el uso de sensores remotos ópticos y de radar y técnicas de procesamiento digital de imágenes (PDI) que permiten generar productos de anomalías de temperatura, mineralogías de alteración hidrotermal y geológica, y mapas de lineamientos estructurales. Satélites como Landsat 8 y Landsat 9, y sensores como ASTER y MODIS poseen bandas espectrales que permiten reconocer anomalías superficiales de alta y baja temperatura asociadas a escenarios geotérmicos, a partir de los canales centrados en longitudes de onda del infrarrojo térmico ($5,0 \mu\text{m} - 14 \mu\text{m}$) e infrarrojo medio ($3,0 \mu\text{m} - 5,0 \mu\text{m}$) como el caso de MODIS (NASA, 2021). De igual manera, estos productos en complemento con Sentinel 2 permiten determinar tipos de rocas y especies minerales de alteración, especialmente en canales del infrarrojo de onda corta ($0,7 \mu\text{m} - 1,2 \mu\text{m}$) (ESA, 2021). El PDI sobre imágenes ópticas y de radar como Sentinel-1 permiten realzar elementos lineales y generar mapas de estructuras, lineamientos y tendencias estructurales del Complejo Volcánico Planchón Peteroa.

La integración, administración y análisis de estos conjuntos de información en Sistemas de Información Geográfica permite evaluar espacialmente y en conjunto cada variable creada, e integrarla con información geológica, y geofísica si las hubiese para evaluar mediante metodologías predictivas y de análisis multicriterio las zonas de mayor potencial geotérmico.

Justificación

Según la IRENA (International Renewable Energy) las fuentes de energía geotérmica constituyen uno de los potenciales más competitivos en cuanto a recurso energético renovable, puesto que puede llegar a proveer grandes cantidades de energía a bajo costo de consumo (Ritcher, 2020). En relación al potencial geotérmico global, los países de América Latina cuentan con un gran recurso geotérmico relacionado a los márgenes tectónicos activos que se ubican en los límites occidentales del continente y que debido a sus características geodinámicas, dan lugar al desarrollo de zonas de subducción y a la formación de sistemas volcánicos activos. Esta condición geográfica ha incentivado a países como Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Argentina, Bolivia y Chile a desarrollar proyectos energéticos relevantes, pero, sin llegar a aprovechar todo el potencial geotérmico (Gischler, 2020). El principal inconveniente que tienen los países en vía de desarrollo para abordar de manera óptima los proyectos de transición energética, se centra en la poca inyección de recursos económicos con los que cada territorio cuenta. Es por esto que el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha proveído en muchos casos la inversión que este tipo de proyectos necesita, apoyando principalmente las actividades exploratorias puesto que son costosas y riesgosas en cualquier escenario (Gischler, 2020).

A pesar de que la inversión de diferentes sectores de la industria, investigación y desarrollo han entregado recursos para explotar este tipo de fuente energética, es importante recurrir a otras técnicas que permitan construir líneas base de conocimiento que pueda apoyar las tareas

de investigación y exploración. El estudio, observación y procesamiento de productos satelitales junto con el uso de herramientas geoespaciales se constituyen como herramientas de información primaria útiles en la exploración de recursos naturales renovables, como el recurso geotérmico. Además, aportan en la investigación y exploración de fuentes energéticas renovables, en pro del cumplimiento de indicadores de objetivos del desarrollo sostenible propuesto en el 2015 por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), como: Energía asequible y no contaminante, Industria, innovación e infraestructura, ciudades y comunidades sostenibles y acción por el clima.

Es por esto, que en el marco de esta investigación se buscará a partir de Tecnologías de Información Geográfica (TIG) identificar y delimitar zonas con potencial geotérmico en el área circundante al Complejo Volcánico Planchón-Peteroa y de la misma manera, definir una metodología para la construcción de variables geológicas y geoambientales, que analizadas, procesadas y conjugadas de manera integral con información geoespacial de libre acceso disponible, permitan cumplir con los objetivos planteados en este proyecto.

1. Objetivos

Objetivo general

Desarrollar una metodología que permita detectar potencial del recurso geotérmico a partir de la generación de productos temáticos obtenidos mediante procesamiento digital de imágenes (PDI) ópticas, térmicas y de radar y, su integración con bases de datos geológicas en entornos SIG.

Objetivos específicos

Estimar temperaturas mediante imágenes térmicas del sensor satelital ASTER, aplicando metodologías que se basa en la emisividad normalizada (NEM).

Extraer lineamientos estructurales a partir de procesamiento digital de imágenes ópticas y de radar y análisis morfométrico sobre topografía digital.

Caracterizar alteraciones hidrotermales mediante la aplicación de índices espectrales, y análisis espectral sobre imágenes ASTER, Landsat y/o Sentinel 2.

Hacer un análisis multicriterio con insumos derivados a partir de herramientas geomáticas e información secundaria que permita establecer zonas con potencial geotérmico del área de estudio.

2. Estado del arte

La cadena volcánica de los Andes se alarga por más de 4000km paralelo a la costa oeste de Sur América, y se subdivide en cuatro zonas según Stern (2004), iniciando de norte a sur, La Zona Volcánica Norte (ZVN) entre $5^{\circ}\text{N} - 2^{\circ}\text{S}$, Zona Volcánica Central (ZVC) comprendida entre latitudes $16^{\circ}\text{S} - 28^{\circ}\text{S}$ Zona Volcánica Sur (ZVS) $33^{\circ}\text{S} - 46^{\circ}\text{S}$ y por último la Zona volcánica Austral (ZVA) en latitudes $49^{\circ}\text{S} - 55^{\circ}\text{S}$ (Figura) donde se sitúan más de 200 volcanes recientes del Peistoceno y Holoceno. El volcanismo de los Andes es el resultado de subducción de las placas oceánicas Nazca y Antártica, bajo la placa continental Sur Americana (Stern, 2004). Los vacíos en volcanismo entre la ZVC y ZVS se asocian a saltos de los ángulos de subducción (definido por la zona Wadati-Benioff mayor a 25°) a profundidades mayores de 90 km de la placa oceánica Nazca (Holbik, 2014).

La ZVC y la ZVS están separadas por el segmento plano de la placa Pampeano ($28-33^{\circ}\text{S}$) en el cual, el ángulo de subducción de la placa nazca es menor a 10° a profundidades aproximadas de 90km. Estas zonas también están separadas por un suave ángulo de subducción por el segmento plano de la placa peruano ($3-15^{\circ}\text{S}$). Sobre los segmentos Planos Pampeano y Peruano existen zonas y segmentos de subucción con inactividad volcánica, esto es debido a las características de la subducción en la que subduce un plateau oceánico, y a su vez hay cambios en el ángulo de subducción (Stern, 2004). Las edades variables de la placa Nazca y la configuración tectónica regional apuntan a la diferencia de propiedades físicoquímicas de las placas que subducen, por lo que se supone, es

Figura 1

Mapa esquemático de las cuatro zonas volcánicas activas en Sur América.



Nota. CSC=Cordillera Submarina Carnegie, CSJF=Cordillera Submarina Juan Fernández, CSN=Cordillera Submarina Nazca, CSCH=Cordillera submarina de Chile. tomado y modificado de Stern, 2004

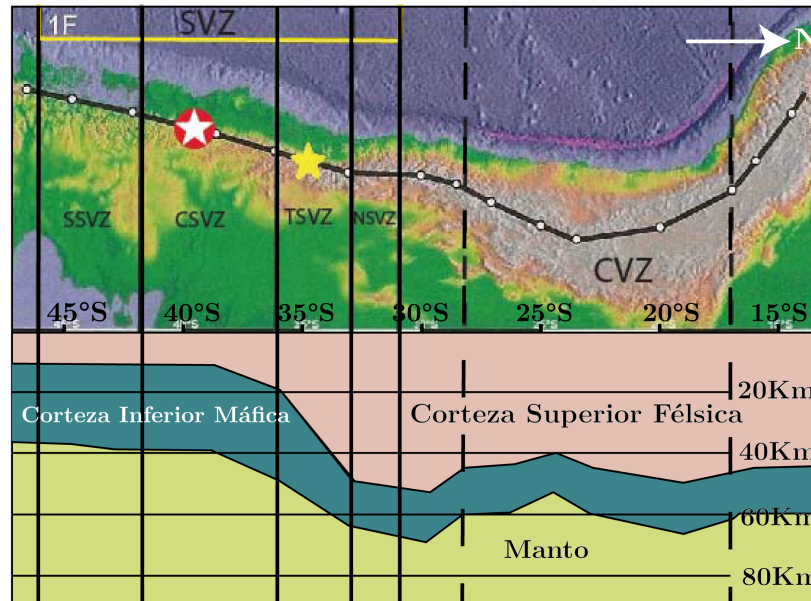
debido a una variación de pendiente de subducción, a lo largo de todo el arco magmático (Holbik, 2014).

2.1. Zona Volcánica Sur

Los volcanes de la (ZVS) están ubicados a lo largo de 1400 km de continuos segmentos de arco, desde 33.3 a 46°S en Chile y Argentina y ambos contienen más de 70 estratovolcanes del pleistoceno y Holoceno, grandes campos volcánicos, al menos nueve complejos de caldera y cientos de menores centros eruptivos (Cembrano and Lara, 2009). El eje del frente volcánico del Holoceno está localizado a aproximadamente 280 km del frente de subducción de Chile y Perú, y tiene un promedio de ancho de 40km, además a los 39° del frente volcánico se incrementa hasta alrededor de 80km. Autores como Tormey et al (1991) y Stern (2004) dividen la ZVS en ZVS norte, ZVS transicional, ZVS central y ZVS sur. La ZVS norte es una corta cadena de volcanes, donde la placa nazca que subduce es de edad aproximada de 45 Ma y subduce a un bajo ángulo de 20°. El arco volcánico hace en un ancho aproximado de mas de 200km desde 34.4° S hasta 39.5°S, y con ángulo de subducción incrementa hasta mas de 25°. Como resultado de la distancia del frente volcánico hasta el frente de subducción, disminuye desde más de 290km en el norte y hacia el final hasta menos de 270km hacia el sur. El decrecimiento en distancia en el frente de subducción causó una división en los drenajes continentales de los Andes, por la localización de los volcanes, situados al final de la zona volcánica norte de la ZVS (Holbik, 2014). Hacia el sur los volcanes se ubican predominantemente al margen oeste de la cordillera de los Andes, cerca de la región Valle Central, que es una cuenca extensional, comenzando con edades del oligoceno tardío. El adelgazamiento

Figura 2

Vista de mapa de la la sección entre 45°S hasta 15°S de la cadena montañosa de los Andes



Nota. Corte esquemático de la subducción y el grosor de la corteza continental, el Complejo Volcánico Planchón-Peteroa se localiza en la estrella dorada. tomado y modificado de Holbik, 2014

de la corteza en la ZVS también varía desde 55-60 km (Figura 2) en la ZVS norte hasta menos de 35km en la ZVSC y ZVSS (Tassara et al., 2006). La corteza bajo la ZVS consiste principalmente de basamento pre-andino Paleozoico y rocas ígneas del Mesozoico y Cenozoico (Holbik, 2014).

Hacia el segmento oblicuo de la ZVS (20 a 30°) la convergencia causa deslizamientos paralelos hacia el arco activo, creando el sistema de Fallas Liquine-Ofqui (LOFS). El sistema de Fallas LOFS controla las ubicaciones de bastantes centros volcánicos, como también pequeños centros eruptivos. Hacia el norte de la ZVS (33.3-34° S) inicia el adelgazamiento de la placa nazca, y es por esto, que existe una disminución de las fallas de rumbo paralelas (Stern, 2004). La zona de estudio, el Complejo Volcánico Planchón Peteroa y su área de incidencia, se encuentra en la ZVST

(34-30°S), el cual comprende 3 volcanes localizados que han estado activos desde 0,55 Ma hasta la actualidad (Hildreth et al., 1984). Esta es la porción mas ancha de todo el arco volcánico sur y las localizaciones de los estratovolcanes y calderas, están controladas por estructuras de falla en dirección NW-SE y NE-SW.

Las rocas de la ZVST, varían considerablemente de un centro volcánico hacia otro. Por ejemplo, el Complejo Volcánico Tatara-San Pedro Pellado que posee rangos en composición desde basaltos andesítico a riolitas, sin embargo, los principales materiales eyectados son principalmente flujos de dacita porfirítica (Holbik, 2014). Otro caso de diferencia composicional comprende el Complejo Nevados de Longavi donde las rocas son principalmente basaltos andesíticos mientras que lavas del Complejo Nevados de Chillan son andesitas basálticas calco-alcalinas a riolitas (Holbik, 2014).

2.2. Geología Regional

El frente volcánico de la ZVST (34,4-37,0°S) tiende hacia N20°E y se se ensancha al este, aproximadamente 80km hacia el oeste de Argentina. Los esfuerzos tectónicos controlan las localizaciones de varios centros volcánicos alineados en dirección NW-SE (Holbik, 2014), a diferencia de complejos volcánicos como el Descabezado Chico y San Pedro Tatara Pellado tienden a NE-SW (Muñoz and Stern, 1988). La ZVST es caracterizada por muchos complejos volcánicos grandes y estratovolcanes compuestos, escudos basálticos y campos volcánicos (Holbik, 2014).

La corteza del ZVST es aproximadamente 30-40 km de grosor y continua adelgazándose hacia el norte (33-34,5°S) de 55-60 km y delgada hacia el sur (42-46°S) de mas de 30km (Figura 2) (Holbik, 2014). Estudios detallados previos (Davidson et al., 1987; Holbik, 2014) de los centros

volcánicos de la ZVST y de ZVSC han propuesto que la baja presión a causa del adelgazamiento de la corteza oceánica en este sector, controla el rango composicional de andesita a ríolita.

2.3. Área de Estudio: Complejo Volcánico Planchón Peteroa

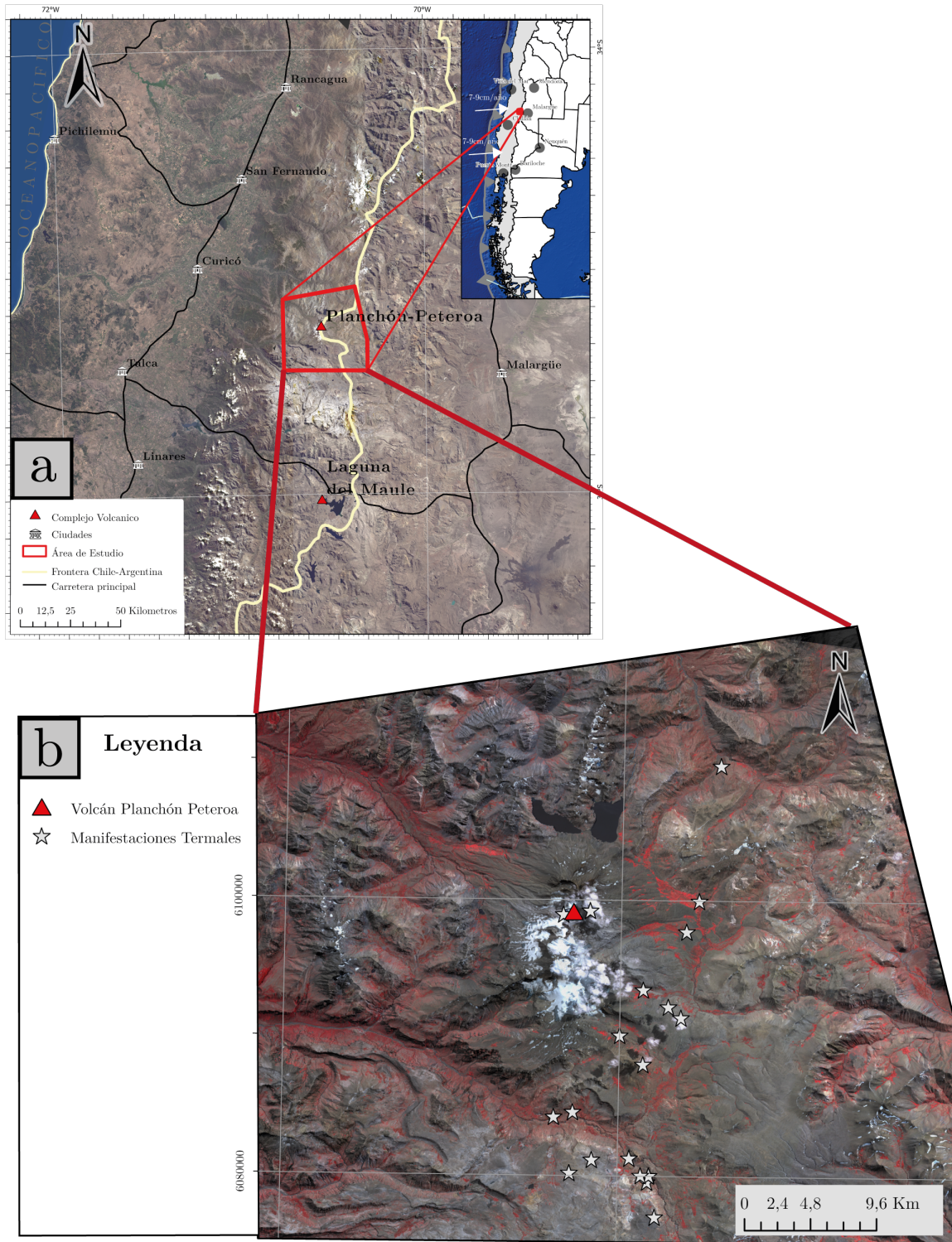
El área de estudio abarca un área de 1555Km^2 (Figura 3) y se localiza el Complejo Volcánico Planchón Peteroa (CVPP), ubicado en la parte norte de la ZVST en los $35^{\circ}15'$ de latitud sur y $70^{\circ}35'$ de longitud oeste, sobre el límite geopolítico de Argentina y Chile, y cerca de las ciudades Curicó y Talca en Chile, Malargue en Argentina. El complejo volcánico posee tres estructuras volcánicas que de Sur a Norte corresponden a Azufre, Planchón y Peteroa. En la zona coexiste un cráter de aproximadamente 5 km de diámetro con cuatro lagos cratéricos con presencia de fumarolas y manifestaciones termales (Figura 3) alineadas en dirección NE-SW (Benavente Zolezzi, 2015).

2.3.1. Tectónica.

El contexto tectónico del CVPP inicia en el Triásico tardío donde existía una cuenca extensional denominada cuenca Neuquén, caracterizada por el desarrollo de numerosos depocentros con fallas de gran magnitud con dirección NW-NNE (Giambiagi et al., 2003). Posteriormente, entre 75-37 Ma, una plataforma de arco se estableció en los 35°S de latitud de manera continua hasta los 11 Ma. Desde entonces hasta el cuaternario, un régimen dextral transpresivo de intra arco, sería el responsable del frente paralelo de subducción, relacionado con la convergencia oblicua de la placa Nazca (Mosolf et al., 2019). Durante el Mioceno temprano y medio, las fallas normales hacia el este fueron invertidas, poniendo en contacto las unidades volcánicas estratificadas con depósitos del Mesozoico (Mosolf et al., 2019; Vigide et al., 2020). Finalmente, desde el Mioceno tardío hasta el presente, los dominios de compresión controlan las estructuras en dirección N-S y NE-SE

Figura 3

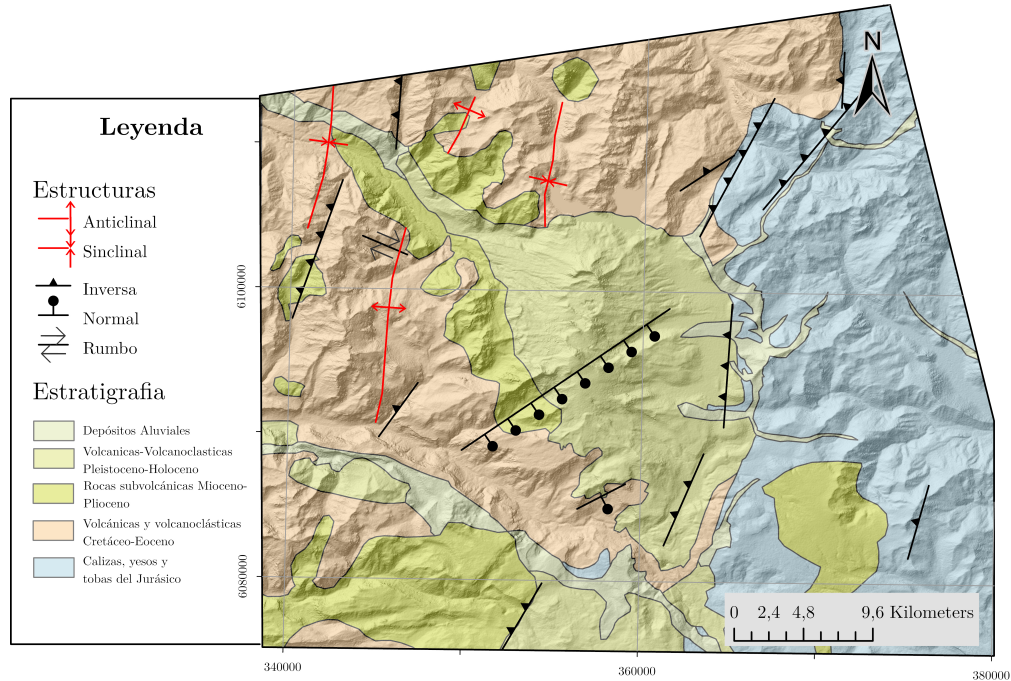
a. Localización regional del complejo volcánico Planchón-Peteroa



Nota. Imagen Landsat-9 combinación color real b. Área de estudio, imagen ASTERL1 en combinación falso color (CIR) R:3 G:2 B:1

Figura 4

Mapa geológico del Complejo Volcánico Planchón Peteroa, tomado y modificado de Vigide et al., 2020



(Vigide et al., 2020).

2.3.2. Estratigrafía.

En los alrededores del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa se expone una secuencia representada por calizas, areniscas y depósitos volcanoclásticos del Jurásico (Tormey, 1989), correspondiente a los grupos Lotena y Mendoza en Argentina. Durante el cretácico tardío hasta el Eoceno (Figura 4), depósitos volcánicos se localizaron al norte y oeste del complejo. A demás, cuerpos intrusivos andesíticos son asociados con depósitos volcano-clásticos de la Formación Huincan, se asocian a edades del Eoceno hasta el Mioceno (Vigide et al., 2020).

En el Pleistoceno tardío, el Complejo Volcánico Planchón-Peteroa empezó a establecerse

con el volcán Azufre, se encuentra a una elevación de 3603m, y es el volcán más antiguo y grande del área. En una erupción magmática se produjo alrededor de 30Km^3 de lavas, piroclastos y lahares de composición principalmente andesita basáltica (70%) y dacitas (30%) (Holbik, 2014) y actualmente son cubiertas por glaciares. Los productos eruptivos de Azufre tienen un rango composicional de 57% a 63% de SiO_2 y han tenido al menos dos intervalos de erupciones dacíticas. El primer intervalo de la actividad dacítica consiste en seis flujos masivos de aproximadamente 0.006Km^3 , sin evidencia de depósitos sedimentarios entre los flujos, indicando un corto intervalo en la actividad extrusiva (Holbik, 2014). La fase dacítica final está preservada como domo en lo más alto del Cerro Azufre. En la evolución de este sistema volcánico, los conductos de emisión o chimeneas han ido migrando y con ello se han construido dos edificios volcánicos superpuestos (Sruoga, 2008). El centro volcánico Peteroa es el volcán más joven, anidado en la estructura antigua de Planchón y está ubicado aproximadamente 6km al norte de Azufre, compuesto aproximadamente de 25km de basalto y lavas basalto andesíticas (Tormey, 1989). Planchón es el volcán con erupciones basálticas más hacia el norte a lo largo de la ZVS, la actividad eruptiva de Planchón consiste en aproximadamente 25Km^3 de basalto y lavas andesitas basálticas, que son transicionales entre series magmáticas toleíticas y calco alcalinas (Holbik, 2014).

Aproximadamente 10.000 años antes del presente Planchón y parte de Azufre colapsaron creando un flujo de avalancha que viajó 75km bajo los valles el valle ubicado al noroeste del volcán (Sruoga, 2008). Después del colapso, un segundo edificio se formó, denominado Planchón 2, dentro del anfiteatro Planchón derrumbado. Planchón 2 ha tenido erupciones de volumen aproxi-

mado de 5Km^3 de basaltos y lavas basálticas-andesíticas, composicionalmente similares a las de Planchón (Tormey, 1989). Estas lavas han sido enterradas por glaciares y posteriores erupciones del Peteroa (Holbik, 2014). El centro volcánico activo mas reciente es llamado Peteroa, Su chimenea principal se construye de conductos entrelazados, a causa de las emisiones de los volcanes Azufre y Planchón con de 1Km^3 de lavas preservadas y materiales piroclásticos (Sruoga, 2008). Las 15 erupciones registradas entre 1660 y 1998 (Sruoga, 2008), además la presencia de actividad fumarólica comprueba que el sistema magmático está aún activo (Holbik, 2014).

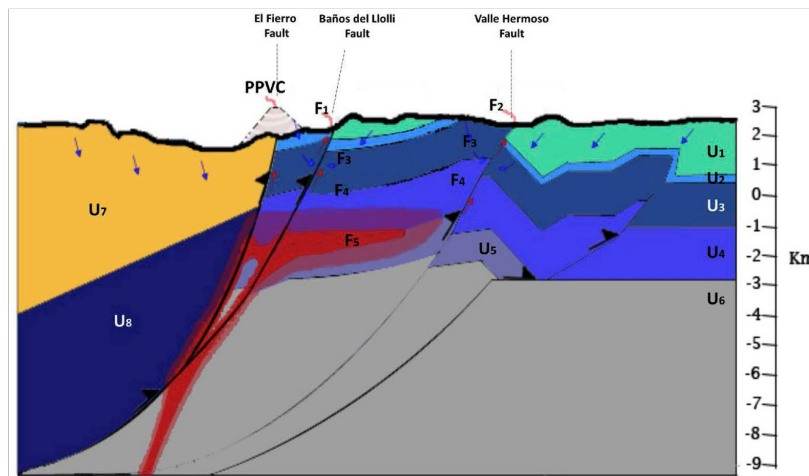
2.3.3. Sistema Geotérmico.

El Complejo Volcánico Planchón Peteroa se encuentra categorizado como sistema geotérmico ígneo joven asociado a volcanismo e intrusiones magmáticas del cuaternario según la clasificación de sistemas geotérmicos bajo condiciones geológicas, geofísicas e hidrológicas (Goff y Janik, 2000). En este modelo, la fuente de calor está dada por la cristalización de cuerpos magmáticos jóvenes.

Zolezzi (2010) propone un modelo hidrotermal conceptual (Figura 5) en su trabajo, el que concluye que existe un control espacial de estratovolcanes y manifestaciones termales determinados por estructuras NE-SW y NW-SE, y se relacionan con reservorios magmáticos (Cembrano and Lara, 2009). De la misma manera resume que el arco volcánico de la ZVST está controlado por la una falla de con rumbo con dirección NE-SW (Zolezzi, 2010) Y que existe un control litológico en las composiciones de las aguas termales, lo que indica que los fluidos alcanzan un equilibrio fluido roca, con las rocas sedimentarias del Mesozoico y rocas volcánicas del Cuaternario (Zolezzi, 2010).

Figura 5

Modelo conceptual del subsuelo, del área relacionada con el Complejo Volcánico Planchón-Peteroa.



Nota. U: Unidad litológica, F: Característica Geológica U1: Vega negra U2: capa de yeso U3: Formación Valle Grande U4: Formación Lotena U5: Grupo Cuyo ? U6: Basamento pre Jurásico U7: Formación Abanico U8: Basamento F1 y F2: Fumarolas F3: Zona de mezcla de aguas subterráneas F4: Segregación Líquido-Gas y Agua evaporándose F5: Cuerpo magmático. Tomado y modificado de Benavente, 2010.

3. Marco Teórico

3.1. Marco geológico de zonas con potencial geotérmico

Los recursos geotérmicos son muy diversos, se presentan en diferentes ambientes tectónicos, reservorios y rocas (Figura 6), además existe una relación espacial entre zonas con potencial geotérmico y los límites de placa (Figura 7), como en bordes de placa convergentes y divergentes donde existe influencia volcánica, alto flujo de calor y régimen de alta presión, que generan la disposición de reservorios térmicos cercanos a la superficie (Elders and Moore, 2016). En cuanto a la clasificación

Figura 6

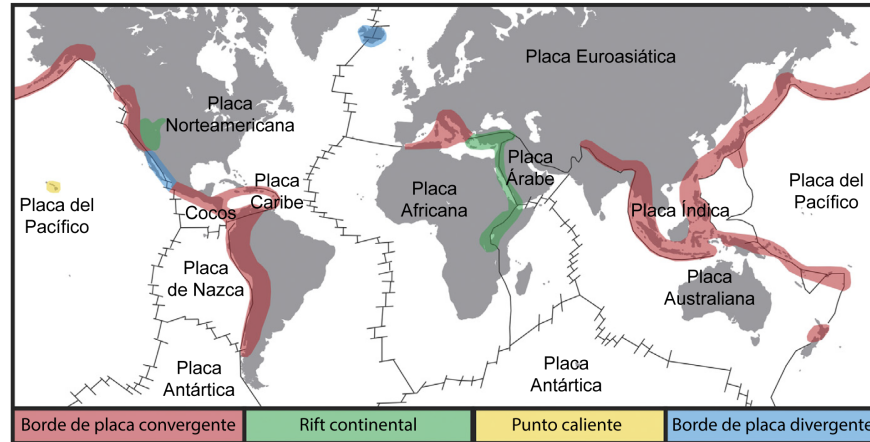
Clasificación de sistemas geotérmicos con potencial económico tomado y modificado de Elders y Moore, 2016

Sistema Geotérmico	Superficial y topografía	Configuración tectónica y fuente de calor	Profundidad del reservorio y tipo de roca	Características superficiales e hidrología	Ejemplos
Volcanes Andesíticos	Estratovolcanes; Alto relieve	Arcos volcánicos en zonas de subducción; diques delgados y sills en los conos; cuerpos grandes a más de 5km de profundidad	Flujos de lava andesíticos, depósitos volcánoclasticos; Recurso es moderado a profundo	Fumarolas y pocas aguas termales; rarsamente depósitos sinter; variedad de outflows laterales; fumarolas solo en dominadas por vapor	Indonesia, Philippines Sistemas Geotérmicos
Sistemas Volcánicos silíceos	Calderas, domos Bajo relieve	Ambientes continentales; grandes cámaras magmaticas a más de 5km de profundidad	Depósitos piroclásticos de riolitas a dacitas; Basamento Mesozoico y Paleozoico; Recurso de profundo a moderado	Aguas termales y pocas fumarolas, los depósitos sinter son comunes, no se frecuentan zonas de outflow y fumarolas solo en dominadas por vapor	Zona volcánica Taupo, Nueva Zelanda; Coso Hot Springs, Estados Unidos
Cuencas Sedimentarias	Bajo relieve	Cuencas de rift, diques y flujo de calor elevado	Depósitos sedimentarios recientes, recuro es moderado	Pocas características superficiales	Salton Trough, Estados Unidos
Sistemas tectónicos Extensionales	Bajo relieve	Zonas de rift continental y cuencas back-arc; regionalmente alto flujo de calor y profunda circulación fluidos	Rocas de basamento Mesozoico y Paleozoico; recurso profundo	Aguas termales y fumarolas escasas, outflow zonas limitadas	Basin and Range, Estados Unidos
Expansión de fondo oceánico	Escudos volcánicos y zonas de rift moderado a bajo relieve	Centros oceánicos de expansión, diques basálticos y sills	Basaltos, a profundidades moderadas	Aguas termales y fumarolas escasas, outflow zonas limitadas	Islandia

de los sistemas geotérmicos, según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) se clasifican en tres, según su temperatura: 1. Baja temperatura (<90°C) 2. Temperatura media (90 a 150°C) y 3. Alta temperatura (>150°C) (Williams et al., 2011), donde únicamente los dos últimos se apro-

Figura 7

Clasificación de sistemas geotérmicos según su régimen tectónico, tomado y modificado de Elders y Moore, 2016



vechan para la producción de energía eléctrica. Existen otras clasificaciones (Muffler and Cataldi, 1978; Hochstein, 1988; Benderitter and Cormy, 1990; Nicholson, 2012) para los yacimientos geotérmicos que se enfocan en categorizarlos según criterios económicos, ingenieriles, hidrológicos y termodinámicos (Goff and Janik, 2000).

En el caso de los principales sistemas importantes y con mayor distribución actualmente, son los intensos procesos magmáticos que ocurren al interior del planeta y la dinámica que ejercen las corrientes convectivas del manto sobre el movimiento de las placas tectónicas, generan en la superficie áreas con anomalías térmicas permanentes, y a su vez deformación como fallas y fracturas por donde el magma y fluidos hidrotermales pueden llegar a la superficie desde gran profundidad (Glassley, 2014; Paucara et al., 2019). La convección es solo una de las formas de propagación de calor en la tierra, ya que ocurre bajo tres fenómenos físicos diferentes: convección, conducción y radiación (Boles and Cengel, 2014; Glassley, 2014; Rinehart, 1980). Otro modelo de sistema

geotérmico abundante es por el fenómeno de conducción, es la transferencia de calor por contacto directo entre dos cuerpos (o partículas) y es el proceso más dominante en la tierra pues cada mineral en contacto con otro transmite cierto flujo de calor, esta cantidad depende de propiedades termodinámicas del mineral. En el caso de los sistemas geotérmicos conductivos la transferencia de calor está dada por el flujo de calor entre las partículas en estratos depositados en cuencas sedimentarias profundas (Nicholson, 2012) y la fuente de calor sería el gradiente geotérmico, dado por el aumento de temperatura conforme aumenta la profundidad.

3.2. Recurso geotérmico

La definición de energía geotérmica hace referencia a la energía térmica en lugares someros de corteza que usualmente se relaciona con un reservorio de altas temperaturas que contiene recursos energéticos aprovechables como sistemas de enfriamiento o calefacción o para producción de energía eléctrica, inclusive como turismo, en este caso se centra en recursos energéticos. Las proyecciones a futuro del uso de energía geotérmica son prometedoras pues el Acuerdo de París que involucra 197 países (COP21, 2015), se enfoca en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el impacto del cambio climático progresivamente hasta el 2050 (COP21, 2015), y para ello se contempla una transición energética donde el recurso geotérmico es fundamental dado que es abundante, renovable, bajo en emisiones de gases de efecto invernadero y rentable a largo plazo (van der Zwaan and Dalla Longa, 2019).

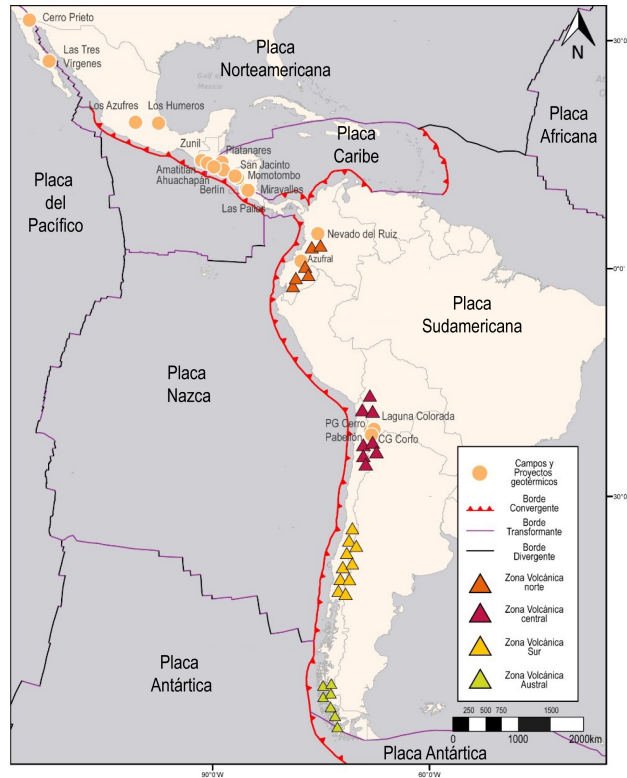
3.2.1. Recurso geotérmico en Latinoamérica.

Latinoamérica actualmente cuenta campos en producción como Cerro Prieto en México con capacidad instalada de 820 MW, Los Azufres en México con capacidad instalada de 242 MW (Ritcher, 2020), Campo geotérmico Berlín en El Salvador con proyección de capacidad instalada de con 116 MW para el 2021 (Hanson, 2020), Planta geotérmica Miravalles en Costa Rica con 60 MW de capacidad instalada, Planta Cerro Pabellón en Chile con 48 MW de capacidad instalada (BID, 2020) (Figura 8).

Los entornos tectónicos a los que se asocian los reservorios geotérmicos comprenden los tres principales estilos estructurales, compresivo, extensivo y de cizalla o transformante. El sistema geotérmico de Cerro Prieto, ubicado en cercanías al sector sur de la falla de San Andrés, que presenta un régimen tectónico principalmente transicional (Townend and Zoback, 2004), donde el modelo geotérmico se relaciona con un sistema magmático con estructuras permeables que permiten encontrar el reservorio en los primeros 3 km de profundidad. Los resultados del estudio en Cerro Prieto determinaron que se debe a un sistema magmático hidrotermal joven cercano a una fuente magmática, según análisis de alteraciones mineralógicas de origen hidrotermal, geotermometría de inclusiones fluidas, isotopos estables, reflectancia de la vitrinita, química de fluidos, e interpretación de registros de pozo (Elders et al., 1984). Para el caso del campo geotérmico Cerro Pabellón, Chile, se localiza en la Zona Volcánica Sur que se caracteriza por ser una provincia magmática asociada a la subducción de la Placa Nazca bajo la Placa Sur Americana (Morata et al., 2020), dando lugar a magmatismo intenso de composición basáltico andesita a dacítico y gran

Figura 8

Localización de campos en proyecto de explotación para Latinoamérica y potencial para la exploración de energía geotérmica en Sur América en relación con el régimen tectónico, modificado de Stern, 2004.



actividad hidrotermal, con zonas de alteración hidrotermal, temperatura muestreada en suelo de 80°C y numerosas fumarolas según estudios realizados (Morata et al., 2020). Debido al control estructural, compresivo y transformante en la cadena volcánica de los Andes, no existen reservorios geotérmicos de este estilo en Centro y Sur América, sin embargo el caso extensional de Islandia, corresponde a los reservorios geotérmicos asociados a ambientes estructurales extensivos.

3.3. Fundamentos de Teledetección

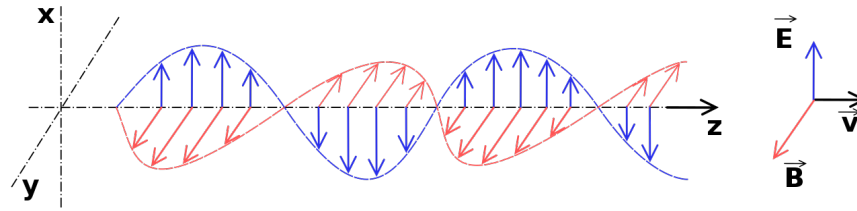
La teledetección se define como la ciencia de observación y adquisición de datos a distancia (Joseph, 2005), ya sea a partir de sensores a bordo de satélites, drones, aviones u otro tipo de dispositivo (Gupta, 2017). Los sensores pueden coleccionar la información de la superficie a partir de dos tipos de instrumentos, ya sea, instrumentos de detección pasivos o activos. La teledetección pasiva es aquella que necesita de una fuente de energía externa para poder generar imagen, mientras que, la teledetección activa cuenta con sensores capaces de producir su propia energía para generar imagen (sensores de radar y tecnología Lidar).

3.3.1. Principios físicos de teledetección.

El principio básico que relaciona a distancia los sensores remotos y los objetos es la radiación electromagnética (REM), cada tipo de objeto refleja o emite determinada intensidad de energía y puede ser medida, la forma como interactúa la REM con el objeto depende de la composición fisicoquímica del objeto, debido a esto es posible diferenciar entre diferentes tipos de objeto como agua, roca, vegetación, minerales, entre otros (Gupta, 2017). Las propiedades de la radiación electromagnética se pueden dividir en dos grupos principales, la teoría ondulatoria y la teoría de la partícula. Maxwell propone cuatro ecuaciones diferenciales que cimientan las bases de la teoría electromagnética como onda que considera que la energía electromagnética se propaga como una onda sinusoidal armónica (Figura 9), la cual puede ser descrita mediante el principio de radiación electromagnética de Max Planck y la relación de Planck-Einstein (Apéndice A).

Figura 9

Onda electromagnética



Nota. Vista lateral (izquierda) de una onda electromagnética a lo largo de un instante y vista frontal (derecha) de la misma en un momento determinado. De color rojo se representa el campo magnético y de azul el eléctrico. Tomado y modificado Dang (2004)

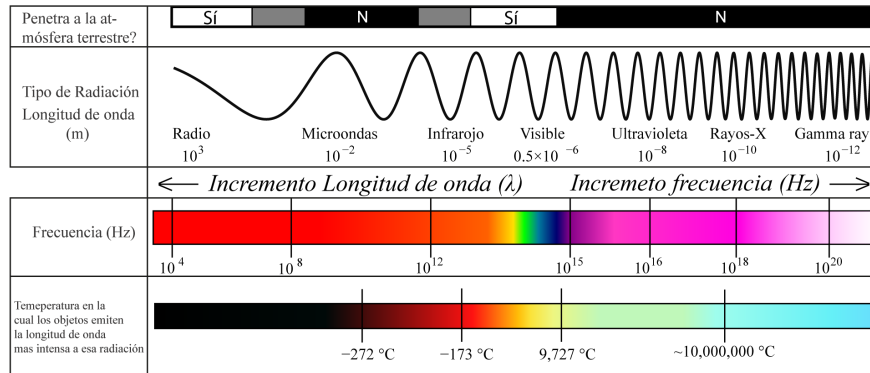
3.3.2. Espectro Electromagnético.

El espectro electromagnético, es el ordenamiento de energía asignado al total de ondas electromagnéticas. Las divisiones se basan en la magnitud de la longitud de onda (Figura 10) y, por tanto, se tienen ondas de radio, microondas, infrarrojo, visible, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. En la actualidad sólo se cuenta con unas porciones del espectro electromagnético para llevar a cabo la teledetección, la región más importante incluye longitudes de onda que inicia desde el espectro visible hasta la región de microondas (Gupta, 2017; Chuvieco, 2016).

En la teledetección se divide el espectro electromagnético de las regiones visible a microondas como se muestra en el tabla 1 (Meneses and Almeida, 2012). De las divisiones, sólo parte del MIR y la totalidad del TIR se hallan en el espectro emisor, donde esta porción de radiación se manifiesta en función de la temperatura, siendo posible tomar el calor para medir la emisividad de las diferentes cubiertas (Chuvieco, 2016), las demás bandas se caracterizan por formar parte del

Figura 10

Espectro electromagnético.



Nota. 1. ¿Las ondas penetran en la atmósfera? N = no penetran la atmósfera, Si= Si penetran la atmósfera, los colores grises es penetración parcial 2. Clasificación de las ondas electromagnéticas y su longitud de onda 3. Frecuencia y 4. Radiación de temperatura en objetos conforme aumenta la frecuencia, modificado de U.S Geological Survey.

reflectivo con el VIS, NIR y SWIR que constituyen la región del espectro que es reflejada por la materia que constituye la superficie de la tierra.

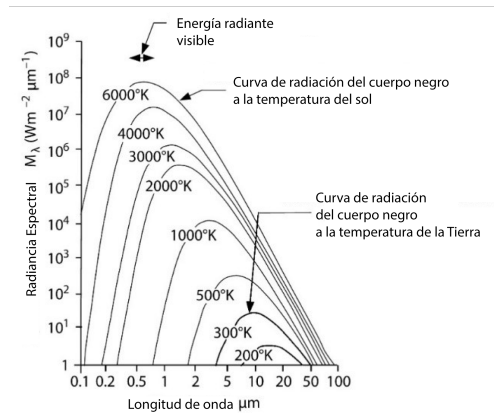
Tabla 1

Clasificación de bandas ubicadas entre 0.4 μm hasta longitudes de onda del microondas, VIS, NIR, SWIR y parte del MIR se encuentran en el espectro reflectivo, TIR y parte del MIR en el espectro emisor (Meneses & Almeida, 2012).

Región	Nombre	Longitud de onda (μm)
Visible	VIS	0.4 – 0.7
Near Infrared	NIR	0.7 – 1.2
Short-Wave Infrared	SWIR	1.2 – 3,0
Mid-Wave Infrared	MIR	3,0 – 5,0
Long-Wave Infrared	TIR	5,0 – 1000,0
Microondas	-	1000,0 – 1,0x10 ⁶

Figura 11

Ley de desplazamiento de Wien.



Nota. Entre mayor sea la temperatura, mayor será la radiación espectral emitida y justo en el valor máximo la longitud de onda es menor

3.3.3. Radiación de un Cuerpo Negro.

La Ley de desplazamiento de Wien describe la temperatura como relación en forma de parábola entre la radiación espectral con la longitud de onda (Figura 11). Es una de las leyes físicas de la radiación y menciona que, a medida que un cuerpo negro teórico gana temperatura puede emitir mayores cantidades de energía en longitudes de onda más corta. De manera similar la Ley de Stefan Boltzmann permite calcular la temperatura conociendo la longitud de onda, por medio de la constante de Stefan Boltzmann (Apéndice B).

3.4. Tipos de Sensores

Los sensores se clasifican según la forma en la que detectan la Energía Electromagnética:

3.4.1. Sensores Pasivos.

Este tipo de sensores pueden generar imagen, pero necesitan una fuente de energía externa que irradie sobre una superficie para que desde la superficie se refleje o emita la energía que el sensor captura (Chuvieco, 2016). Dentro de estos sensores se encuentran los sensores fotográficos, ópticos eléctricos y de antena). Ejemplos de sensores pasivos están Landsat 7 con el sensor ETM+, Landsat 8 con OLI/TIRS, Landsat 9 con OLI 2 y TIRS 2, ASTER con los tres subsistemas en el SWIR, VNIR, TIR y Sentinel-2.

3.4.2. Sensores Activos.

Este tipo de sensores tienen su propia fuente de energía que les permite generar imagen, actualmente se disponen de sensores activos como los radares y la tecnología Lidar (basado en tecnología láser). Ejemplos de sensores activos están los satélites Sentinel-1, Radarsat, SAOCOM, entre otros.

3.5. Tipos de Resolución de Sensores Remotos

La resolución de sensores hace referencia a la habilidad de discriminar información (Chuvieco, 2016). Es importante contar con diferentes resoluciones, pues la resolución cambiará según el enfoque de la investigación (Meneses and Almeida, 2012).

Resolución espacial: Es la representación de área por pixel de la imagen, resolución espacial de 30m es que un píxel tiene 30x30m.

Resolución espectral: Indica el número y ancho de bandas en las que el sensor puede captar radiación electromagnética.

Resolución radiométrica: Hace alusión a la cantidad de niveles digitales usados al expresar

la radiancia recolectada por el sensor.

Resolución temporal: Se refiere a la repetitividad de observaciones sobre un área, es equivalente al tiempo de intervalo entre dos tomas de medidas.

3.6. Productos Satelitales

Tabla 2

Características técnicas (Resolución espectral y espacial) de productos satelitales

Producto	Bandas	Longitud de onda (µm)	Res espacial (m)	Producto	Bandas	Longitud de onda (µm)	Res espacial (m)
Landsat 7 ETM+	1	0.45 – 0.52	30	ASTER	1	0.52 – 0.60	15
	2	0.52 – 0.60	30		2	0.63 – 0.69	15
	3	0.63 – 0.69	30		3N	0.78 – 0.86	15
	4	0.77 – 0.90	30		3B	0.78 – 0.86	15
	5	1.55 – 1.75	30		4	1.60 – 1.70	30
	6	10.40 – 12.50	30		5	2.145 – 2.185	30
	7	2.09 – 2.35	30		6	2.185 – 2.225	30
	8	0.52 – 0.90	15		7	2.235 – 2.285	30
Landsat 8 OLI/TIRS	1	0.43 – 0.45	30		8	2.295 – 2.365	30
	2	0.45 – 0.51	30		9	2.365 – 2.430	30
	3	0.53 – 0.59	30		10	8.125 – 8.475	90
	4	0.64 – 0.67	30		11	8.475 – 8.825	90
	5	0.85 – 0.88	30		12	8.925 – 9.275	90
	6	1.57 – 1.65	30		13	10.25 – 10.95	90
	7	2.11 – 2.29	30	14	10.95 – 11.65	90	
	8	0.50 – 0.68	15	S2A-S2B			
	9	1.36 – 1.38	30	1	0.443-0.442	60	
	10	10.6 – 11.19	100	2	0.492-0.493	10	
	11	11.50 – 12.51	100	3	0.560-0.559	10	
Landsat 9 OLI 2/TIRS 2	1	0.435-0.451	30	4	0.665-0.665	10	
	2	0.452-0.512	30	5	0.704-0.704	20	
	3	0.533-0.590	30	6	0.741-0.739	20	
	4	0.636-0.673	30	7	0.783-0.780	20	
	5	0.851-0.879	30	8	0.833-0.833	10	
	6	1.566-1.651	30	8a	0.865-0.864	20	
	7	2.107-2.294	30	9	0.945-0.943	60	
	8	0.503-0.676	15	10	1.373-1.376	60	
	9	1.363-1.384	30	11	1.613-1.610	20	
	10	10.60-11.19	100	12	2.202-2.185	20	
	11	11.50-12.51	100				

3.6.1. Landsat 7.

Con el sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) proporciona imágenes que constan de ocho bandas espectrales incluyendo una banda pancromática y una térmica, cuya resolución espacial es de 30 metros para las Bandas 1 a 7, aunque en ocasiones la 6, tiene resolución de 60 metros. La resolución para la Banda 8 (pancromática) es de 15 metros.

3.6.2. Landsat 9.

Se equipa con dos instrumentos, OLI 2 y TIRS 2, que se asemejan a los de Landsat 8, cuenta con mejoras significativas como una resolución radiométrica de 14 bits (Markham et al., 2018) además tiene la capacidad de adquirir más de 700 escenas por día.

3.6.3. ASTER.

El sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER). El instrumento obtiene imágenes de media resolución espacial a $15 m^2$ e imágenes termales con $90 m^2$ por píxel, en 14 longitudes de onda diferentes (tabla 2), que van desde la luz visible hasta la infrarroja térmica. Los productos ASTER se pueden descargar con diferentes niveles de procesamiento, donde los valores L1A son de radianza corregida y registrada en posición al terreno y el AST_08, son en valores de temperatura superficial.

3.6.4. Sentinel-2.

Produce escenas con 13 bandas espectrales desde los 443 nm a 2190 nm, con resolución espacial de 10 m, 20 m, y 60 m, y ancho de barrido de 290 km, y resolución radiométrica de 12bit <5% (precisión).

3.6.5. Sentinel-1.

El satélite tiene 4 modos de adquisición 1. Strip Map Mode, con resolución espacial de 5x5m con ancho de barrido de 80 Km 2. Interferometric Wide Swath Mode, con 250km de barrido, 5x20m de resolución espacial con sincronización de interferometría (burst synchronisation for interferometry) 3. Extra-wide Wath Mode, con 400 Km de barrido con 25x100 m de resolución espacial y por último 4. Wave mode, con 5x20 m de resolución espacial y muestrea imágenes de 20 x 20 Km con 100km de intervalos a lo largo de la órbita (ESA, 2021).

3.7. Caracterización de Anomalías Térmicas

Los sistemas geotérmicos se encuentran en regiones donde el alto flujo de calor se relaciona con la presencia de intrusiones ígneas jóvenes o rocas muy profundas en la corteza (Haselwimmer and Prakash, 2013). Datos TIR adquiridos por sensores remotos son útiles para mapear y cuantificar anomalías de temperatura asociado a características geotérmicas superficiales como, geysers, fumarolas, aguas termales y suelo caliente (Figura 12). La distribución espectral de energía que irradian objetos como los de la figura 12 dependen de su temperatura y emisividad, y pueden ser descritos mediante La Ley de Planck (Suárez et al., 2021). La longitud de onda que describe la radiancia máxima espectral emitida por una superficie caliente es inversamente proporcional a su temperatura, esos picos máximos de radiancia espectral emitida son explicados por La Ley de desplazamiento de Wien. Es por esto que se puede cuantificar mediante información satelital y radiómetros abordo de satélites la manifestación y cambios térmicos dados sobre una superficie

Figura 12

a. aguas termales b. geysers c. fumarolas d. pozos de lodo o mudpools tomado de (Haselwimmer & Prakash, 2013)



caliente.

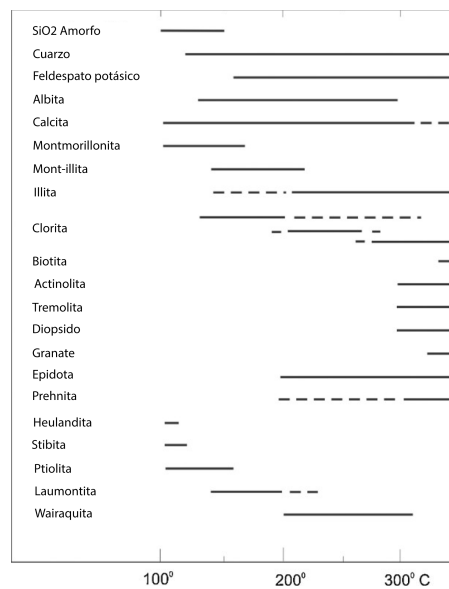
La temperatura no es una propiedad intrínseca de la superficie, pues varía con la radiación solar que ingresa a la tierra y con las condiciones meteorológicas, a diferencia de la emisividad que sí es una propiedad intrínseca de la superficie y es independiente de la irradiancia (Gillespie et al., 1998). El algoritmo TES (Temperature and Emissivity Separation) para determinar las temperaturas y emisividades espectrales para imágenes multiespectrales en longitudes de onda del infrarrojo (8-12 μm) y debe cumplir dos objetivos i) la estimación exacta y precisa de temperaturas superficiales, especialmente sobre vegetación, agua y hielo ii) recuperar las emisividades exactas y precisas para los sustratos minerales. El algoritmo TES reclasifica las imágenes para que no haya discontinuidades artificiales en el producto (Apéndice C).

3.8. Mapeo Espectral de Minerales

Todos los materiales de la superficie terrestre interactúan con la radiación electromagnética, absorbiendo y reflejando la energía incidente de manera única y particular, en espectroscopia se le denomina firma espectral. Las firmas espectrales son la relación entre la intensidad de la radiación electromagnética y las longitudes de onda para diferentes materiales (Gupta, 2017).

Figura 13

Alteración de minerales y su estabilidad térmica asociados a sistemas geotérmicos, tomado y modificado de van der Meer et al., 2014



La capacidad de la materia de transmitir, reflejar o absorber energía hace posible identificar objetos mediante sus firmas espectrales (Weng, 2010). En los minerales superficiales es posible medir las firmas espectrales que los caracteriza, siendo esta relación una de las pruebas directas que dan indicio de actividad geotérmica (Figura 14), partiendo de que los minerales de alteración

hidrotermal son formados principalmente por la interacción de fluidos calientes y la roca expuesta, añadiendo factores como temperatura, presión, tipo de roca, permeabilidad, composición de fluido y duración de la actividad termal que condicionan el tipo de minerales de alteración que se ubican en un sistema geotérmico (Browne, 1970, 1978). Para identificar un mineral mediante las firmas espectrales conocer y estudiar el comportamiento de la absorción espectral. Siendo así, en la región de longitud de onda de $0,4-2,5\mu\text{m}$ las características de absorción espectral de los minerales registran la interacción de la luz con los cationes (Fe, Mg, Al) y los aniones (OH, H₂O, CO₃) en las estructuras minerales (Hunt, 1977). Por otro lado, en la región del TIR, los grupos de minerales, incluidos los silicatos, los carbonatos, sulfatos, fosfatos e hidróxidos muestran rasgos de absorción espectral característicos (Haselwimmer and Prakash, 2013). Según Littlefield y Calvin (2014) y van der Meer et al (2014) en sistemas geotérmicos es posible encontrar 7 minerales característicos entre ellos la alunita, la caolinita, el ópalo, la calcita, la moscovita, la montmorillonita, y una mezcla de moscovita y clinocloro.

3.9. Extracción de lineamientos mediante Procesamiento Digital de Imagen (PDI)

El mapeo de estructuras geológicas como fallas y lineamientos es de gran importancia para conocer la permeabilidad de sistemas geotérmicos, permitiendo la circulación de fluidos hidrotermales y a su vez el flujo de agua meteórica. Son estos lugares donde se concentran las expresiones termales de un sistema geotérmico como lo son géiseres, aguas termales, piscinas de lodo y fumarolas. Los lineamientos son estructuras lineales cartografiables en una superficie, dichos rasgos representan fenómenos en el subsuelo que pueden ser fallas, fracturas, diaclasas o altos estructurales bosquejados como línea o curvilínea, estas son de carácter cartografiable por medio de sensores remotos.

Ahora bien, resulta indispensable resaltar los lineamientos en una imagen satelital, basados en la aplicación de procesamiento digital de imágenes (PDI) que permitan hacer transformaciones espaciales que modifiquen y realcen las características de interés (Meneses and Almeida, 2012).

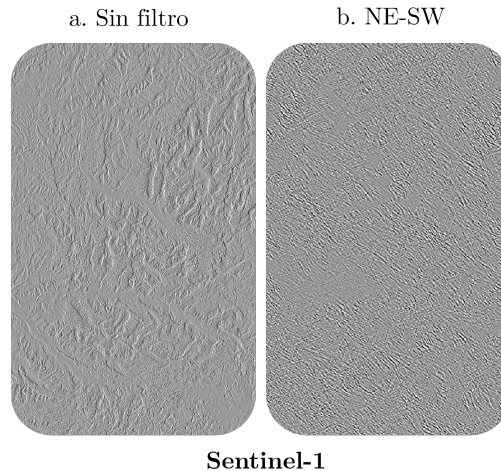
Los filtros de bordes direccionales permiten resaltar los cambios bruscos asociados al valor del píxel en zonas adyacentes, los cuales indican bordes entre objetos que pueden ser espectralmente distintos. En una imagen, los bordes pueden tener varias direcciones, y la capacidad de detectar estas direcciones y destacarlas en la imagen puede ser muy deseable pues pueden corresponder a un lineamiento geológico (Meneses and Almeida, 2012), los filtros de bordes direccionales se pueden aplicar a una imagen de radar con valores de retrodispersión para resaltar estructuras o lineamientos en direcciones N-S, NE-SW, E-W y NW-SE, y son conocidos también como matrices de convolución (Adiri et al., 2017b).

3.10. Métodos de Evaluación Multicriterio

Es una herramienta usada en el proceso de toma de decisiones y se basa en conjugar variables que indiquen la existencia o posición de un fenómeno. Una de las ventajas para entornos SIG (Sistemas de Información Geográfica) es la obtención de resultados coherentes y racionales con el trabajo integrado de diferentes puntos de vista y junto con la integración de capas de evidencia permite delimitar y caracterizar zonas de mayor interés (Yalcin and Gul, 2017).

Figura 14

imagen a. es un producto satelital Sentinel-1 GRD en valores de retrodispersión b. es el producto filtrado mediante filtro convolucional NE-SW, resaltando lineamientos en esa dirección.

**3.10.1. Modelamiento basado en SIG.**

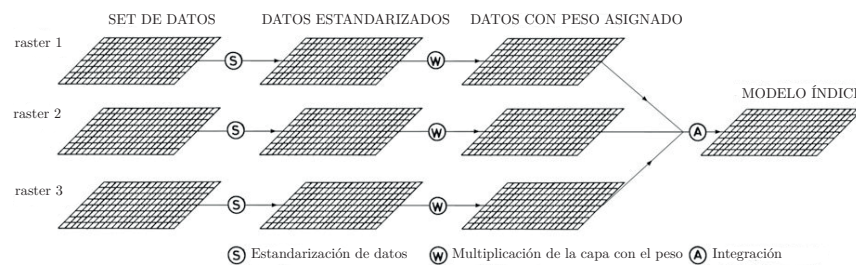
En esta investigación, los datos que se utilizan para representar modelos se componen de valores de posición (Latitud, Longitud) y Z que representa la variable que describe el fenómeno, por ejemplo, el ráster de temperatura superficial, donde cada píxel contiene el valor asociada a la variable física, en este caso la temperatura superficial(Figura 20.c). La integración de los sets de datos se realiza aplicando diferentes modelos geoestadísticos avanzados (modelos matemáticos multivariables), detallados a continuación (Gupta, 2017).

3.10.1.1. Modelos de índice. Un modelo de índice (en inglés denominado Index models) calcula el valor índice para cada píxel y genera un mapa mostrando el rango de distribución basado en los valores índice. Es una operación de superposición donde se produce un dato tipo raster. El flujo de trabajo para aplicar el modelamiento se resume en la figura 15(Gupta, 2017). Las

capas de evidencia corresponde al set de datos que representa el fenómeno, estas capas deben ser estandarizadas por igual (s), con el fin de obtener los datos en el mismo rango, seguidamente por medio de la multiplicación de la capa escalada con el peso de la variable (w) se estima el nuevo valor del modelo (Modelo de índice), este, adquiere valores para cada pixel generando la capa índice en raster.

Figura 15

Diagrama de flujo de la metodología de aplicación para crear un Modelo de índice, tomado y traducido de Gupta, 2018



3.10.1.2. Modelos de regresión. Un modelo de regresión desarrolla una relación entre una variable dependiente y un set independiente de variables en forma de ecuación, que puede ser una predicción o una estimación (Gupta, 2017). Existen dos tipos de modelos de regresión, lineal y logística. El propósito de el modelo de regresión es para interpolar y/o predecir valores de y. (Gupta, 2017).

3.10.1.3. Modelos de proceso. Los modelos de proceso (en inglés denominado Process models) utiliza una relación matemática entre un set de variables físicas y algún tipo de fenómeno ambiental, y es usado para predecir el fenómeno dependiente del ambiente. Estos modelos son conocidos como modelos conceptuales, pues son frecuentemente dinámicos y la relación

puede ser derivada empíricamente (Gupta, 2017).

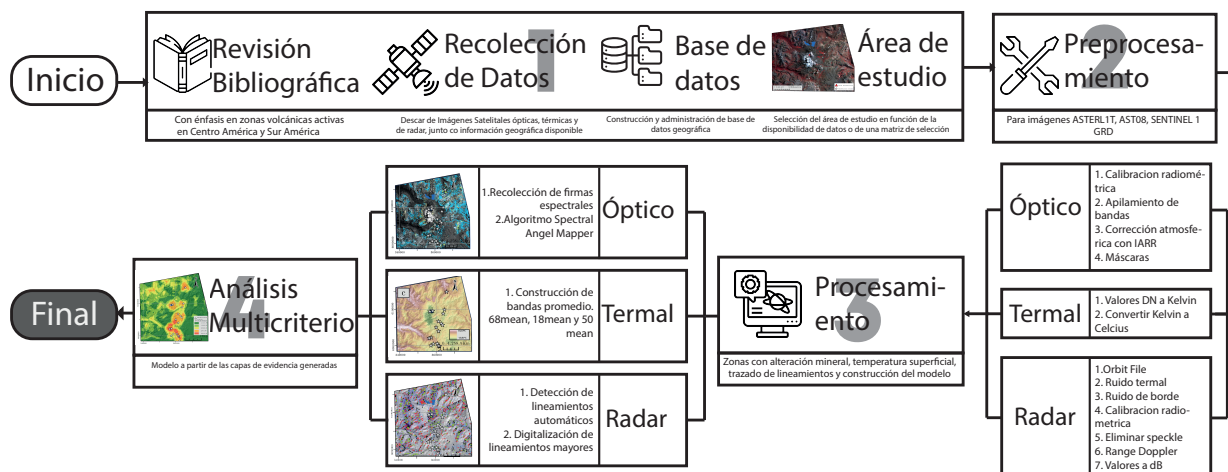
3.10.1.4. Modelos probabilísticos. Los modelos probabilísticos en la teoría de Bayesiana de probabilidad. La probabilidad es la medida de la certidumbre de que ocurra un evento. Esto implica la estimación previa de la ocurrencia de un fenómeno en dadas ciertas condiciones (Gupta, 2017). Cálculos el MLC (Maximum Likelihood Classifier) ha sido usado ampliamente en los sensores remotos y es un ejemplo probabilístico típico (Gupta, 2017), o WoE (Pesos de Evidencia).

4. Metodología

El desarrollo metodológico llevado a cabo para cumplir con los objetivos de este proyecto constó de seis fases de trabajo que se resumen en el diagrama de flujo de la figura 16 y se desarrolló principalmente en cuatro etapas. La primera fase consistió en la revisión del estado del arte que incluyó la revisión bibliográfica principalmente sobre vulcanismo y el estado de la geotermia a lo largo de la Cordillera de los Andes y la región de la Zona Volcánica Sur con el fin de seleccionar sitios de interés que pudieran ser evaluados para definir el área de trabajo y análisis. También se revisaron trabajos principalmente sobre el uso de sensores remotos como técnica de exploración geotérmica, y sobre la aplicación de los SIG y sensores remotos en estudios de prefactibilidad de zonas con potencial geotérmico. Posterior a la definición del área de estudio, se realizó la búsqueda

Figura 16

Diagrama de flujo de la metodología del proyecto



de la información geográfica y geocientífica disponible para el área de análisis. La información

geoespacial fue revisada y estructurada por categorías temáticas y mediante ésta se realizó una primera base de datos geográfica que actuó como repositorio centralizado para administrar todas las variables e insumos a ser usados en el análisis espacial final. De esa manera productos ASTERL1T fueron descargados para caracterizar los minerales de alteración hidrotermal, ASTER08 para obtener valores de temperatura superficial y Sentinel-1 para el trazado automático de lineamientos morfoestructurales.

La segunda fase incluyó el preprocesamiento de los productos satelitales ópticos, térmicos y de radar descargados desde las geoportales. El preprocesamiento es un paso requerido en el tratamiento digital de imágenes puesto que permite eliminar de las imágenes errores sistemáticos que tienen los productos satelitales cuando son adquiridos. Las correcciones básicas que se aplicaron sobre las imágenes ópticas fueron las atmosféricas, las calibraciones radiométricas y la aplicación de máscaras de nubes para eliminar cualquier ruido que pudiera interferir en análisis posteriores. En las imágenes de radar las correcciones aplicadas fueron las geométricas, las calibraciones radiométricas y la aplicación de filtros para suavizar el moteado o “speckle” característico de las imágenes de radar. En el caso de las imágenes térmicas fue necesario convertir valores desde Niveles Digitales (DN) a kelvin y posteriormente calcular grados celcius a partir de grados kelvin.

La tercera fase incluyó el procesamiento de las imágenes a partir de la aplicación de diferentes algoritmos o metodologías de análisis los cuales permitieron derivar los productos que se usaron junto con información secundaria en el análisis multicriterio de la fase cuatro para determinar las zonas con mayor potencial de poseer recursos geotérmicos en función al análisis espacial de idoneidad realizado. Finalmente, se realizará la redacción y adecuación de resultados y estruc-

turación del documento final.

4.1. Revisión de estado del arte y construcción de la base de datos geográfica

La revisión bibliográfica permitió establecer e identificar las variables de análisis y el marco metodológico/conceptual para la generación de productos derivados desde diferentes tipos de sensores remotos, y su integración final mediante análisis de probabilidad espacial con base SIG (Aravena et al., 2016; Gischler, 2020; Conde and Johanis, 2021).

En la identificación del área de estudio se identificaron siete áreas relacionadas con sistemas geotérmicos convectivos de tipo volcánico reciente, ubicados sobre la Cordillera de los Andes (Tabla 3). Se priorizaron sistemas geotérmicos vinculados a volcanes del cuaternario, ya que en estos sistemas sus características geológicas y tectónicas presentan manifestaciones directas sobre la superficie, asociadas a fuentes de energía geotérmica (van der Meer et al., 2014).

La selección del área de estudio se realizó teniendo en cuenta zonas con indicios geotérmicos y junto con la construcción una matriz de disponibilidad de información (Tabla 3), se evaluó de manera integral el acceso a fuentes de información geológica y geoespacial. En cuanto a productos de teledetección se tuvo en cuenta la disponibilidad de imágenes multiespectrales de ASTER, Landsat 7, Landsat 8, Landsat 9 y Sentinel-2, mientras que en imágenes de radar SAR se tuvo en cuenta las imágenes de Sentinel-1. En cuanto a información geoespacial se consideró el acceso a información de tipo geológica, información geoquímica, geofísica e información de cartografía base (Tabla 3). Entre los diferentes escenarios volcánicos evaluados y tal como se observa en la Tabla 3, el que mayor cantidad de información provee es el Complejo Volcánico Planchón-Peteroa que se ubica en la provincia de Mendoza entre el límite político de Chile con Argentina y que es definido

por el Servicio Geológico de Argentina como un área geotérmica de gran interés (Conde and Johannis, 2021). Dentro de la información y datos disponibles del Complejo Planchón Peteroa, se logró acceder a diferentes capas de información espacial de manera gratuita desde el portal de geodatos del SEGEMAR (Servicio Geológico Minero de Argentina) y el SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería). La estructura de los datos consultados son geometrías vectoriales para datos discretos y modelos raster para datos de superficie y geofísica. Los datos incluyeron: las fallas y estructuras geológicas, unidades geológicas y estratigrafía, datos de geoquímica multi-elemento, información de cartografía base, geofísica de radiometría, gravimetría, magnetometría y campo magnético total. Las capas a las que se tuvieron acceso en formato shapefile y ráster fueron las fallas, estructuras, geología, geoquímica multielemento, cartografía base, radiometría, gravimetría, magnetometría y campo magnético total en tipo TIFF. Además, se logró adquirir información del mapa geológico a escala 1:100.000 para el volcán Planchón Peteroa, y se tuvo acceso a un gran conjunto de datos de imágenes y/o productos satelitales (Tabla 3).

Finalmente, el método geoestadístico PFA (Play Fairway Analysis) de definición "plays" fue seleccionado en la integración de las capas de evidencia formuladas a partir de este trabajo y la información secundaria adquirida, con el fin de definir zonas de alto potencial geotérmico en inmediaciones del Complejo Volcánico Planchón Peteroa (Lindsey et al., 2021). Es una técnica para mapear áreas con potencial geotérmico usando capas de evidencia que se relacionen espacialmente, las evidencias deben estar enlazadas con fenómenos de calor, fluidos y permeabilidad (Lautze et al., 2018). El flujo de trabajo de un PFA comprende inicialmente la revisión bibliográfica, reco-

Tabla 3

Tabla de comparación entre zonas volcánicas con potencial geotérmico.

País	Localización		Volcán	Tipo	Disponibilidad de imágenes						Datos geoespaciales			
	Norte	Este			ASTER	S1	S2	L7	L8	L9	G	Gq	Gf	C
Bolivia-Chile	-22.557000	-67.853000	Putana	Estratovolcán	2	30	48	10	100	2	✓	✓	✓	✓
Chile	-17.720555	-69.772777	Tacora	Estratovolcán	2	16	35	17	100	5	✓	✓	✓	✓
Chile	-18.030176	-69.600332	Colpitas	Estratovolcán	2	15	35	17	60	5	✓	✓	✓	✓
Chile	-22.334845	-68.015164	El Tatio	Sistema hidrotermal	6	10	55	20	100	4	✓	✓	✓	✓
Chile	-21.851974	-68.178698	Apacheta-Aguilucho	Complejo volcánico	6	10	40	6	60	7	✓	✓	✓	✓
Chile- Argentina	-35.238202	-70.579722	Planchón-Peteroa	Complejo Volcánico	15	29	95	22	15	10	✓	✓	✓	✓
Chile- Argentina	-36.020156	-70.585188	Laguna el Maule	Complejo volcánico	17	32	115	20	17	10	✓	✓	✓	✓

Nota. Imágenes ASTER son de nivel de procesamiento L1T, Sentinel 1 corresponden al tipo GRD, Sentinel 2 como S2MSI2A de las plataformas S2A y S2B, para Landsat 7 L2SP, en el caso de L8 corresponden a C1L2 y para productos de Landsat 9 L2SP. S2=Sentinel 2, L7=Landsat 7, L8=Landsat 8, L9=Landsat 9. G=Geología, Gq=Geoquímica, Gf=Geofísica, C=Cartografía base.

lección de información geográfica y construcción de base de datos, en segunda instancia, a partir de los datos recolectados generar capas de evidencia, y por último es necesario, integrar las capas, asignar pesos de evidencia para crear el modelo (Foum, 2018). PFA es un método de ayuda para la representación de la localización de un fenómeno, como resultado de la combinación de las capas de evidencia, se produce el modelo final que puede ser categorizado según el objetivo.

4.2. Preprocesamiento

La etapa de preprocesamiento digital de imágenes (PDI) incluyó todos los procedimientos realizados sobre las imágenes orientados a minimizar o eliminar errores o distorsiones de tipo geométrico, radiométrico y atmosférico. Este procedimiento se aplicó sobre los datos ópticos y de radar utilizados en el análisis, como etapa previa y correctiva previo a la derivación de las variables temáticas desde estos.

4.2.1. Imágenes de Radar: Sentinel-1.

Con el objetivo extraer lineamientos morfoestructurales automáticos, se descargó el producto de amplitud (datos de plarimetría) asociado a datos:

SIA_IW_GRDH_ISDV_20220923T095656_20220923T095721_045130_0564B2_6602

de radar SAR y con fecha de adquisición del 23 de Septiembre del 2022 y procesamiento Level-1, adquiridos en modo Interferometric Wide (IW) y con información de amplitud y tipo de dato Ground Range Detected (GRD), obtenido desde el portal de datos espaciales de libre acceso Copernicus de la ESA (European Spacial Agency). A partir de esta imagen de radar se realizaron las diferentes etapas de PDI, que consistió en aplicar correcciones de tipo radiométrico, correcciones geométricas y espaciales, con el fin de mejorar la integridad y calidad del dato. El siguiente flujo de trabajo realizado para corregir el producto está basado en el flujo de trabajo para el preprocesamiento de productos Sentinel-1 propuesto por Filliponi (2019).

1. Ejecutar la corrección de órbita (Orbit File): Esta corrección asigna posición y velocidad del satélite del día de la adquisición.
2. Remover el ruido termal de la imagen (Thermal Noise Removal): Para remover el ruido térmico en el canal de polarización cruzada.
3. Remover el ruido de borde (Remove Border Grid Noise): Se realiza con el fin de corregir distorsiones geométricas generadas por la curvatura terrestre.
4. Aplicar calibración radiométrica: Convierte los valores de nivel digital de la imagen a valores

de retrodispersión radiométrica.

5. Aplicar filtrado en la imagen para eliminar el Speckle: El speckle es un ruido de las imágenes de radar relacionado a un moteado sobre la imagen que puede alterar los valores radiométricos de la escena. El filtrado busca suavizar el ruido generado por el speckle sin comprometer en gran medida los valores radiométricos de la imagen.
6. Calibrar para el efecto Doppler (Range Doppler): Busca corregir distorsiones geométricas relacionadas con la geometría lateral de la adquisición.
7. Convertir valores a dB: El coeficiente de retrodispersión se convierte finalmente a valores de decibeles.

4.2.2. Imágenes ópticas: ASTERLIT.

Con el objetivo de clasificar los píxeles del área de estudio con minerales de alteración hidrotermal, se descargaron dos productos ASTERLITv003, los cuales fueron adquiridos por el sensor el 9 de abril del 2003 y el 10 de marzo del 2004 respectivamente (tabla 4), con nivel de procesamiento Level-1 precisión del terreno corregida y registrada al sensor de radianza (*Level-1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance*). Este producto es creado de un remuestreo del producto ASTER L1A. El proceso de corrección del precisión del terreno incorpora datos de elevación digital, derivados con puntos de control en campo (GCPs) para alcanzar la precisión topográfica de las escenas (Tomado y traducido de USGS). Los productos se seleccionaron teniendo en cuenta la disponibilidad de 14 bandas espectrales en los rangos del VNIR, SWIR y TIR, también con porcentaje de nubosidad menor al 15 % y adquiridas de día.

Tabla 4

Información general de los productos ASTERLIT. CC% = Porcentaje de nubosidad, DN = Adquirida de día o de noche

Nº	Escena	CC%	Fecha de captura	DN
72829	SC:AST_L1T.003:2156327960	4.0	2004-03-10T14:52:06.62	DIA
24808	SC:AST_L1T.003:2154501522	1.0	2003-04-09T14:52:20.093Z	DIA

Las técnicas de pre-procesamiento y PDI sobre los datos ópticos que se aplicaron fueron:

1. Aplicar una corrección radiométrica: minimizar efecto atmosférico, errores instrumentales, entre otros.
2. Realizar un apilamiento de las bandas espectrales, para obtener las bandas con el mismo tamaño de píxel y aplicar correcciones sobre estas.
3. Aplicar corrección de atmosférica con IARR (Internal Average Relative Reflectance): Con el propósito de reducir el efecto de la interacción del sensor con la atmósfera.
4. Aplicar mascarar: Consistió en remover píxeles de coberturas de la tierra que no son de interés de análisis y que no aportarían información para el objetivo del estudio. Corresponden a coberturas diferentes a suelo/roca descubierto e incluyen cobertura de vegetación, agua, glaciales, sombras y nubosidad. Las máscaras fueron creadas mediante segmentación binaria con un umbral (treshold) a partir del índice geoambiental NDVI para la vegetación, y para las demás variables mediante segmentación en las bandas donde los materiales presentan picos de absorción espectral (tabla 5).

Tabla 5

Umbral de clasificación de materiales a enmascarar

Material	Banda	Umbral μm
Vegetación	NDVI	0,18 - 1
Agua	3	0 - 0,5
Sombras	3	0 - 0,6
Cobertura glaciari	1	2,8 - 4,9
Nubes	1	2,8 - 5

4.2.3. Imágenes térmicas: ASTER08.

Se descargaron 144 productos AST_08V003 con el propósito de realizar un análisis multitemporal de la información de temperatura de superficie (LST de Land Surface Temperature) sobre el área de interés. los productos AST_08V003 contienen valores de píxeles en Niveles Digitales (DN) de temperatura cinética superficial derivada desde la imagen, con 90m de resolución espacial. Se aplicaron calibraciones de tipo radiométrica sobre todas las escenas con el objetivo de convertir los valores de Nivel Digital (DN de Digital number) a unidades físicas de temperatura (°C). Para ello se aplicaron dos operaciones aritméticas con el set de datos descargado:

1. Convertir los valores de DN a Kelvin, multiplicado los datos por 0.1 que es un factor de escala que se aplica para derivar la temperatura a grados kelvin.
2. Convertir la temperatura desde grados kelvin a grados centígrados.
3. Apilar los 144 set de datos en mosaicos multitemporales sobre los cuales se realizará el análisis espacio-temporal de temperatura de superficie.

Por conveniencia y eficiencia de tiempo fue utilizado un algoritmo (Apéndice E) que com-

bina librerías de Python como Os y ArcPy, para poder realizar el procesamiento y adecuación de los datos en bloque y de manera semi-automatizada sobre todo el set de datos.

4.3. Procesamiento

4.3.1. Imágenes de Radar: Sentinel-1.

El filtrado espacial tal como se denoto en la sección anterior, corresponde a un procesamiento digital de imágenes en el dominio espacial, funciona a partir de matrices de convolución, las cuales se definen como operadores matemáticos que hacen transformaciones espaciales sobre las imágenes y minimizan o resaltan detalles en la imagen que deseen mejorarse (Ramli et al., 2010; Sedrette and Rebai, 2016; Adiri et al., 2017a). En esta etapa de procesamiento, y con el objetivo de aplicar PDI para realizar la extracción de lineamientos y discontinuidades estructurales, se aplicó un proceso de filtrado sobre las imágenes resultantes del pre-procesamiento con matrices de convolución de Sobel (Figura 17) (Thannoun, 2013). Estas matrices funcionan como filtros direccionales que permiten resaltar algunos bordes o patrones estructurales cuyo rumbo tenga la dirección indicada y resaltada por cada matriz.

Figura 17

Matrices de convolución Sobel, tomado de Ghazi, 2013

	N-S		NE-SW			E-W			NW-SE			
<i>SOBEL</i>	-1	0	1	-2	-1	0	-1	-2	-1	0	1	2
	-2	0	2	-1	0	1	0	0	0	-1	0	1
	-1	0	1	0	1	2	1	2	1	-2	-1	0

Los filtros de Sobel permitieron generar productos ráster desde los cuales fue posible identificar tendencias regionales mediante la extracción de características estructurales de manera ma-

nual con interpretación visual y mediante un enfoque semiautomatizado con algoritmos y metodologías de extracción de líneas en imágenes. El procedimiento de extracción de lineamientos automáticos se realizó desde el Software PCI Geomática, en donde se importan los productos raster filtrados (N-S, NE-SW, E-W y NW-SE), y mediante el algoritmo Line se extraen vectores lineales sobre los píxeles resaltados desde cada filtro direccional, a partir de estos datos se procede a exportar el vector como shapefile, para realizar la limpieza y análisis de los resultados, y calcular el rumbo, longitud y categorizar según la dirección de cada línea.

4.3.2. Imágenes ópticas: ASTERLIT.

Con la finalidad de clasificar minerales de alteración hidrotermal asociados a ambientes geotérmicos se usaron insumos multispectrales ASTERL1Tv003 con nivel de procesamiento Level-1 y posteriormente fueron preprocesados como se ha mencionado en el apartado anterior. Las imágenes multispectrales adquieren información en diferentes rangos del espectro electromagnético que ayudan al investigador en el reconocimiento de minerales (van der Meer et al., 2014). En los productos ASTERL1Tv003, Las bandas del SWIR que cuentan con resolución espacial de 30m, son especialmente útiles en la identificación de alteraciones hidrotermales (caolinita, alunita, illita, montmorillonita, clorita, serpentina, entre otros) y las bandas VNIR para identificación las alteraciones de óxidos de hierro (Galvão et al., 2005; Azizi et al., 2010; Zamyad et al., 2019).

Existen diferentes abordajes para la identificación de alteraciones minerales hidrotermales desde imágenes multispectrales. En este trabajo se aplicaron ratios de bandas, índices espectrales y métodos de clasificación supervisada con el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper). Éste últi-

mo corresponde a una técnica de clasificación de imágenes, en donde a partir de su espectralidad se clasifican los minerales comparando el ángulo entre el valor espectral de referencia y valor espectral de cada pixel, para determinar la similitud entre ambas firmas espectrales (Kodama et al., 2010; Ranjbar, 2011; Govil et al., 2018).

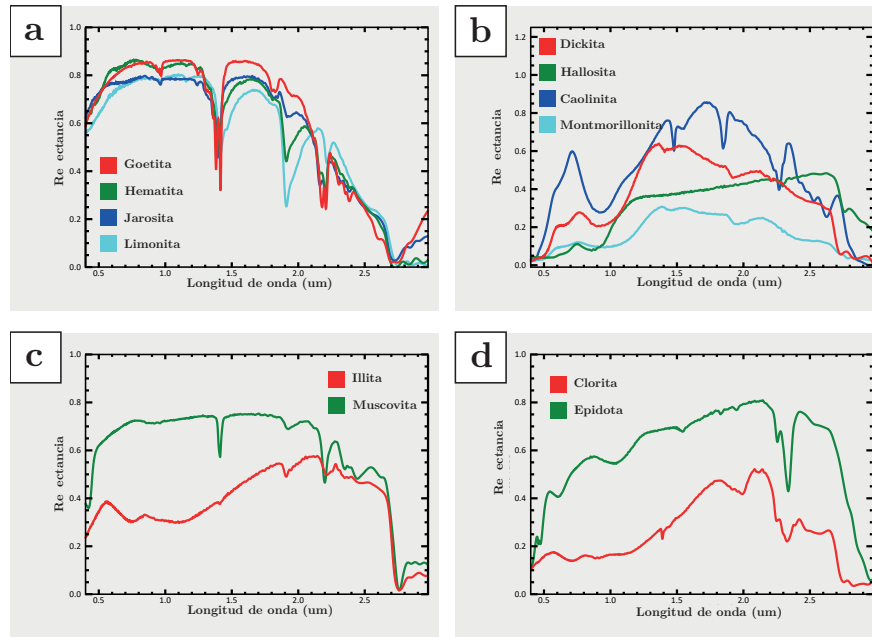
Las firmas espectrales usadas como referencia (Figura 18) pertenecen a la biblioteca de firmas espectrales del USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) que permitieron tener valores de referencia, que en este caso corresponden a espectros teóricos de laboratorio asociados al comportamiento espectral de diferentes especies y grupos minerales. El algoritmo SAM permitió la clasificación de píxeles que fueron interpretados como píxeles de alteración hidrotermal y minerales indicadores, de los grupos óxidos de hierro, alteración argílica, alteración fílica y alteración propilítica, a partir de la identificación de las firmas espectrales de laboratorio con las extraídas desde la imagen, y su posterior interpretación a la luz de otra información geológica.

4.3.3. Imágenes térmicas: ASTER08.

Con el objetivo de estimar temperaturas sobre la superficie que comprende el Complejo volcánico Planchón Peteroa, se usó como insumo base productos ASTER -Temperatura Cinética Superficial (AST_08v003). El producto AST_08V003 es un producto derivado desde las 5 bandas térmicas de ASTER centradas desde 8 a las 12 μm , por medio del algoritmo TES (Temperature/Emissivity Separation) (Gillespie et al., 1998), el cual usa la radiancia superficial obtenida por datos ASTER corregidos atmosféricamente. El algoritmo TES primero calcula bandas de emisividad en cada uno de los canales TIR para luego usarlos como referencia en el cálculo de temperatura superficial. Estos datos se entregan como productos procesados de temperatura y se lograron descargar desde

Figura 18

Firmas espectrales de minerales de alteración a. Grupo óxidos de hierro b. Grupo alteración argilica c. minerales illita (alteración fílica) y muscovita como indicador de ambientes magmáticos hidrotermales d. grupo de alteración propilítica, tomado de USGS



el sitio web oficial de Earth Data de la Nasa (https://lpdaac.usgs.gov/products/ast_08v003/).

Para analizar las temperaturas superficiales y definir posibles anomalías térmicas se descargó un total de 144 productos AST_08v003 con fechas de adquisición que abarcan desde el año 2000 hasta el 2022 (para mas detalle de la información de los 144 productos utilizados ver el Apéndice F), con nubosidad entre 0 – 15 % y filtradas por noche.

Desde el conjunto de datos térmicos ya calibrados a valores de temperatura superficial en grados Celsius, se eligieron los productos que compartiera exactamente la misma franja de adquisi-

ción, esto con el fin de traslapar las imágenes térmicas y poder construir series espacio-temporales de temperatura. Del total de las 144 imágenes descargadas, 68 productos fueron finalmente seleccionados para los análisis posteriores.

El proceso de selección para la construcción de las capas promedio resultó en los tres conjuntos de datos, 68 promedio (color azul y rojas), 18 promedio (color azul) y 50 promedio (color rojo), que fueron denominados debido al número de imágenes que se utilizaron en el promedio de las capas. La capa 68 promedio se construyó a partir de las imágenes que abarcaron la misma área, es decir con mejor traslape del set de datos principal constituido por 144 imágenes de temperatura superficial (Apéndice F). El parámetro que se tuvo en cuenta en la selección de las imágenes que componen las capas promedio 18 y 50 fue la relación temporal de la adquisición de las imágenes y los reportes de anomalías térmicas detectadas por el algoritmo MODVOLC desde el año 2000 (Apéndice G). La capa 18 promedio se compone de las imágenes que se encontraban más cerca temporalmente a los reportes de emisión del algoritmo MODVOLC, con una brecha temporal entre uno y dos meses, a diferencia de la capas 50 promedio, que fueron seleccionadas las imágenes con mayor distancia temporal de adquisición en referencia a las emisiones de MODVOLC.

4.4. Análisis Multicriterio

Con el objetivo de generar un modelo que represente zonas con potencial geotérmico en el área de estudio, se analizaron diferentes tipos de modelamiento basado en SIG como, modelos de índice, modelos de regresión, modelos de proceso y modelos probabilísticos. Se seleccionaron los modelos de índice debido a que son modelos de complejidad media que permiten modelar de manera

integral diferentes set de datos relacionados con estudios geotérmicos (Lindsey et al., 2021). Este modelado calcula el valor índice para cada unidad de área (píxel), generando un mapa con rangos de distribución en relación a los valores índice (Gupta, 2017), los valores índice pueden ser determinados bajo diferentes criterios, como suma promedio o multiplicación de las evidencias con los pesos. El flujo de trabajo para aplicar un modelo índice (Figura 15), inicia con un set de datos de tipo raster, los cuales representan criterios de evidencia que se relacionan con la posición del fenómeno, en segunda instancia, los datos deben ser estandarizados con el fin de escalar los datos en el mismo rango, es decir que los límites sean valores iguales en cada ráster, posteriormente cada evidencia debe ser asociada con un valor con relación directa al fenómeno a modelar, junto con un cálculo adicional como suma promedio, es posible obtener un valor de píxel que modele el fenómeno.

El modelo PFA para exploración geotérmica aplicado en el estudio de Lindsey et al (2021) sigue la metodología de un modelo índice para crear nuevos raster denominados modelos de atributos mediante el uso de capas de evidencia como, alteración mineral, localización de calderas, mapeo estructural, manifestaciones termales, lagos, lineamientos morfoestructurales, estructuras y unidades volcánicas recientes. Posteriormente, los modelos de atributos y variables se agrupan en set de variables mayores denominados modelos y que corresponden a los tres principales condicionantes de la existencia de un sistema geotermal: modelo de calor, modelo de fluidos, y modelo de permeabilidad.

En esta investigación se utilizó la herramienta de analítica raster *Suitability Modeler* en el software ArcGIS Pro, el cual ha sido usado para generar el modelo de análisis espacial para deli-

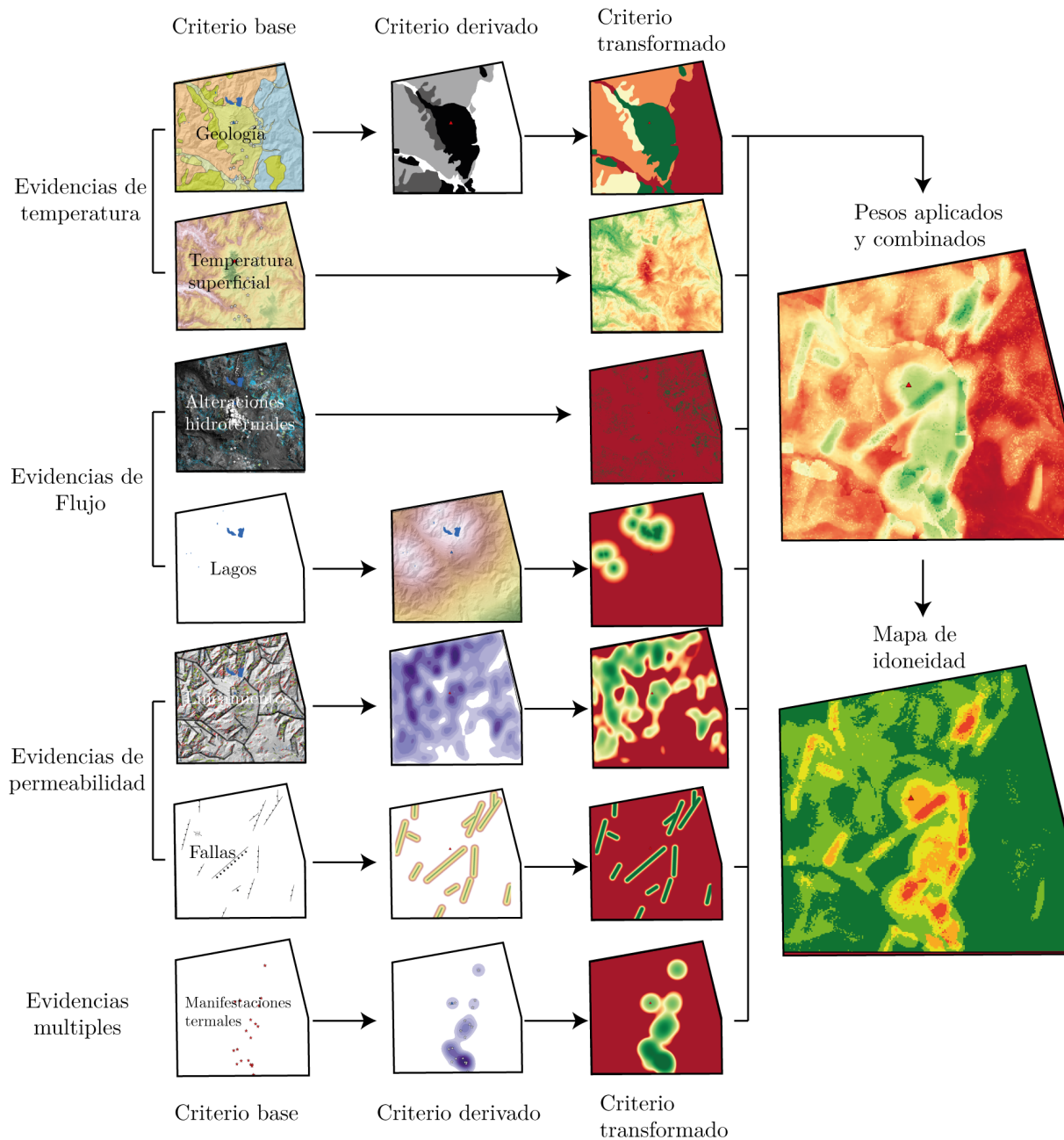
mitar zonas con potencial geotérmico (Figura 15). Se seleccionó esta herramienta para producir el modelo, ya que ha sido aplicado en la exploración e investigación de zonas con potencial geotérmico (Faulds et al., 2020; Wang et al., 2021; Lindsey et al., 2021) y por que por su versatilidad es útil en precisar áreas de interés según las capas de evidencia.

El flujo de trabajo en la ejecución de la herramienta Suitability modeler está resumido en la Figura 19, consta de 5 estados o etapas.

1. La primera etapa consistió en definir los criterios base los cuales poseen alguna característica relacionada con la ubicación de zonas de alta temperatura superficial. Como se menciona anteriormente, de manera simplificada y según la literatura son tres atributos geológicos los que condicionan la presencia de recursos geotérmicos en un área: La fuente de calor, la disponibilidad de fluidos y la presencia de discontinuidades que condicionen la permeabilidad de las rocas relacionadas (Lindsey et al., 2021). A partir de esto, fueron creadas y agrupadas las variables temáticas según la evidencia a representar.
2. La segunda etapa consistió en preparar los datos para garantizar la interoperabilidad de los datos que corresponden a tipo raster debido al tipo de modelo a ser usado. como por ejemplo, el criterio base de geología corresponde a un grupo de polígonos que representan la geología del área, y que debe ser clasificado según su importancia con el potencial geotérmico con variables categóricas.
3. En la tercera etapa los criterios derivados fueron transformados con el fin de normalizar los datos para que todos se encuentren escalados, compartan los mismos rangos de valores y

Figura 19

Flujo de trabajo para delimitar y definir zonas de potencial geotérmico



sean interoperables entre sí.

4. La cuarta etapa se resume en la integración de los criterios transformados, lo primero que se ejecuta es el factor del peso de la evidencia con cada capa, los factores de peso para cada capa y después se obtienen los valores de píxel calculados con el mayor valor promedio. Los factores de peso para cada evidencia serán mencionados en el siguiente apartado.
5. Por último, a partir de un ajuste de visualización y semi-cuantitativo de los datos obtenidos en la etapa cuatro, se produce el modelo de análisis espacial para delimitar aquellas zonas con mayor potencial geotérmico.

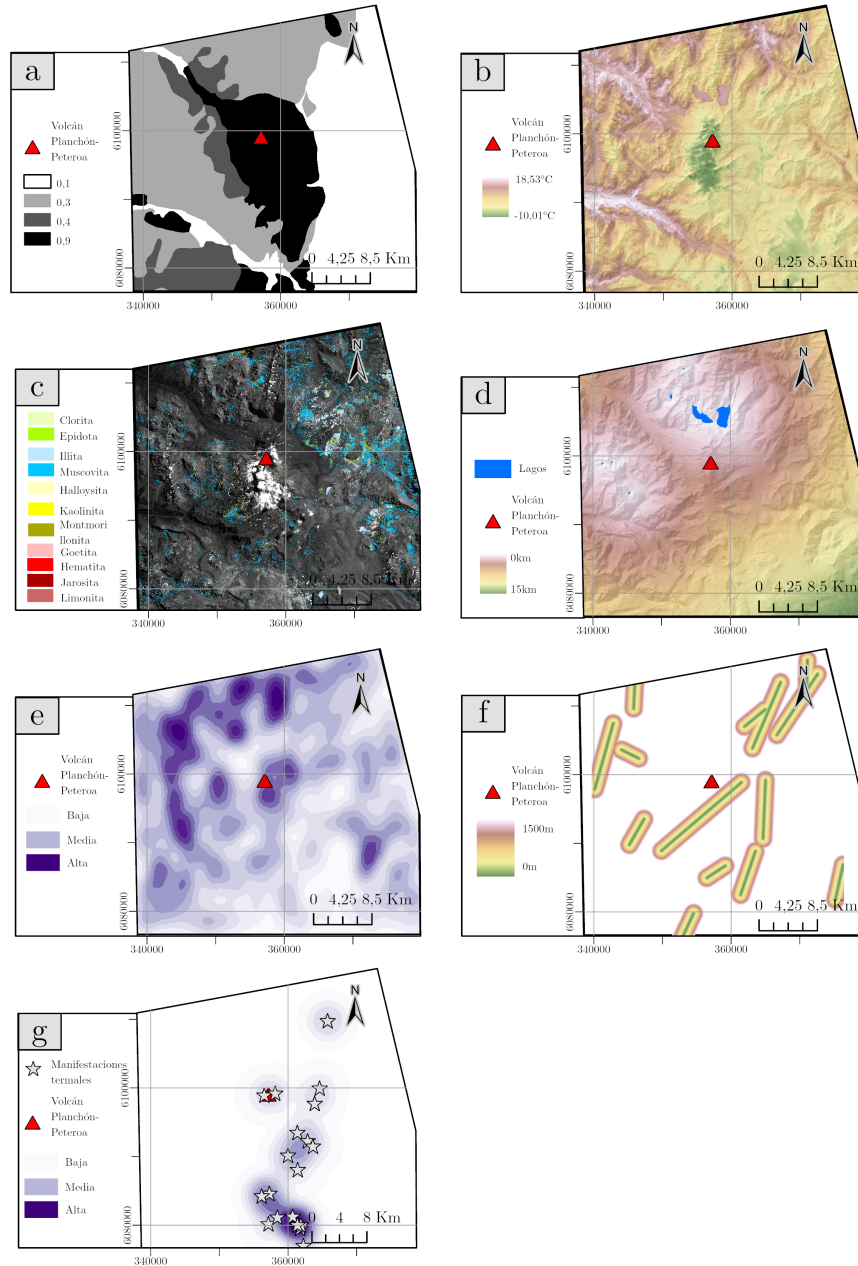
En ese sentido, el modelamiento espacial se realizó a partir de los grupos de evidencias que se mencionaron anteriormente y que corresponden a evidencias de temperatura, evidencias de flujos hidrotermales, evidencias de permeabilidad, y manifestaciones termales (Figura 20).

4.4.1. Evidencias de Temperatura.

Las evidencias de temperatura en este modelo se componen por dos capas de evidencias: 1) Unidades geológicas 2) Temperatura superficial. La capa de unidades geológicas fue tomada y adaptada de los trabajos realizados por Zolezzi (2010) y Vigide et al (2020) sobre el área de influencia del Complejo Volcánico Planchón-Peteroa. Los valores de pesos asociados a cada una de las unidades geológicas fueron adaptados desde Lindsey et al (2021) basados en el tipo de litología y su relación con vulcanismo reciente principalmente. A las unidades volcánicas de edad Pleistoceno y Holoceno fueron asignados valores de 5 ya que corresponden a unidades volcánicas recientes (constituidas principalmente por andesitas basálticas, lavas andesíticas y depósitos piroclásticos

Figura 20

Capas de evidencia utilizadas en el modelo



Nota. a. Unidades volcánicas del Pleistoceno y Holoceno=0,9. Rocas subvolcánicas del Mioceno-Plioceno=0,4. Rocas volcánicas y volcanoclásticas del Cretáceo-Eoceno=0,3. Calizas, yesos y tobas del Jurásico y depósitos aluviales=0,1 b. Temperatura superficial en grados Celcius c. Mineralogía detectada con Spectral Angle Mapper d. Distancia a superficie de agua en Km e. Densidad de lineamientos morfoestructurales f. Distancia euclidiana a fallas medido en Km g. Densidad de manifestaciones termales.

dacíticos), que por sus características físicas y reológicas son las más óptimas para coexistir con este recurso. Las rocas subvolcánicas con lavas basalto andesíticas y andesitas dacíticas de edad Mioceno-Plioceno se les asignó valor de 3. Por otro lado, las litologías menos favorables corresponden a unidades compuestas por rocas volcánicas y volcanoclásticas del Cretácico-Eoceno a las cuales se les asignó un valor de 3. Finalmente se les asignó un valor de 2 a las calizas, yesos y tobos de edad Jurásico y un valor de 1 a los depósitos de tipo aluvial de edad Cuaternario.

La capa de temperatura superficial corresponde al producto final del análisis multitemporal de las capas AST_08v003 procesadas en el apartado 7.3.3. La temperatura superficial promediada para el periodo de análisis permitió ubicar espacialmente aquellas zonas con variaciones considerables en los valores de temperatura superficial, y a su vez permitió analizar las mismas desde un contexto espacial y temporal mediante una serie temporal. Debido a la naturaleza de este dato y que fue construido a partir de análisis raster de tipo local (van der Meer et al., 2014). Cabe resaltar que en el caso de la capa de temperatura superficial, ya se encontraba en datos raster, y con representación directa en el modelo, de manera que el criterio base cumple características para ser criterio derivado y no necesitó de este paso.

4.4.2. Evidencias de flujo hidrotermal.

Las evidencias de flujo hidrotermal adaptadas al modelo corresponden a las capas de evidencia de alteraciones hidrotermales y distancia a lagos. En cuanto a la capa de alteraciones minerales, esta fue generada después del procesamiento en la sección 7.3.2. Se agruparon en cuatro grupos de alteración mineral que se relacionan con ambientes geotérmicos. Estos corresponden a minerales pertenecientes a óxidos de hierro, ensambles minerales que pertenecen a la alteración fílica,

alteración argílica y propilítica. Los pesos de evidencia para estos grupos minerales fueron realizados teniendo en cuenta el modelo propuesto por Lindsey et al (2021) y fueron ajustados y tenidos en cuenta otros valores para la asignación de pesos según otros autores (Guerrero et al., 1918; Littlefield and Calvin, 2014; van der Meer et al., 2014). De esta manera, los pesos de evidencia asignados corresponden a valores de 5 para los ensambles con minerales pertenecientes a alteraciones argílicas y fílicas, y valores de 3 para minerales característicos de alteraciones propilítica y minerales de óxidos de hierro.

Los lagos fueron incluidos en las evidencias de fluido debido a que una superficie de agua indica de manera directa el tope superior de la tabla de agua, lo que es una evidencia de la presencia de fluido en superficie y cercano a la superficie (Lindsey et al., 2021). La delimitación de los cuerpos de agua (Figura 20.d) de tipo lago fue realizada teniendo en cuenta (Sruoga, 2008; Zolezzi, 2010; Vigide et al., 2020) y apoyados en índices espectrales de agua como el NDWI (*Normalized Difference Water Index*) y el MNDW (*Modified Normalized Difference Water Index*) que permitió verificar mediante el comportamiento espectral del agua la presencia y delimitación de los mismos. Para convertir el criterio base en criterio derivado, se realizó la adecuación y transformación a partir de la herramienta de distancia euclidiana.

4.4.3. Evidencias de permeabilidad.

Las capas de evidencia de permeabilidad que fueron incluidas en el modelo corresponden a densidad de lineamientos morfoestructurales y distancia a estructuras geológicas de tipo fallas. La capa de lineamientos morfoestructurales resultó de la combinación de lineamientos mayores y lineamientos menores que fueron generados a partir de la imagen de radar SAR Sentinel-1 en la

sección 7.3.1. Los lineamientos tanto mayores como menores fueron utilizados para crear la capa derivada llamada densidad de lineamientos, la cual muestra la relación de cantidad de lineamientos por una unidad de análisis de 1km^2 . Fueron usados tanto los lineamientos como la distancia a fallas como evidencias de permeabilidad debido a que los rasgos lineares de superficie se relacionan con la existencia de fracturas y fallas que influyen en la permeabilidad secundaria en los sistemas geotérmicos (Zolezzi, 2010).

Para el trazado de las estructuras geológicas de tipo falla, se tomaron y modificaron sus trazados desde trabajos previos (Sruoga, 2008; Zolezzi, 2010; Vigide et al., 2020), y en relación a expresiones superficiales vistas en el producto de lineamientos y el uso de productos digitales del terreno (Figura 4). A partir de estos trazos generados se derivó la capa de distancias a fallas a partir de la creación de un área de influencia a 1.5km a lado y lado de las fallas según Lindset et al (2021).

4.4.4. Manifestaciones Termales.

Los datos de manifestaciones termales fueron compilados desde diferentes trabajos (Zolezzi, 2010; Gutiérrez et al., 2012; Vigide et al., 2020) donde presentan la localización de diferentes tipos de manifestaciones termales que incluyen, fumarolas y aguas termales. Esta capa de evidencia fue escindida de las demás evidencias debido a su importancia, ya que las manifestaciones termales corresponden a evidencias directas de las tres variables discutidas previamente (evidencias de temperatura, de fluidos y de permeabilidad) (Lindsey et al., 2021), y es por esto que en el proceso de análisis de idoneidad esta capa tiene tanta representación en el modelo.

La ubicación de las manifestaciones termales permitió crear la capa de evidencia de densi-

dad de manifestaciones termales la cual representa zonas de alto flujo, alta temperatura y permeabilidad, debido a que la existencia de este fenómeno en el área de estudio representa circulación de fluidos y alto calor (Lindsey et al., 2021).

En este sentido, se resumen los criterios adecuados y listos para usar en el modelo final.

i) Los criterios base para evidencias de temperatura es la geología y temperatura superficial, ii) Los criterios de evidencias de flujo son las alteraciones hidrotermales y las distancia a lagos, iii) Los criterios base para las evidencias de permeabilidad se componen por trazos de lineamientos y fallas, iv) Por último, las manifestaciones termales son evidencias de temperaturas que contrastan con los valores de temperatura de zonas no anómalas y a su vez corresponden a evidencias de zonas con alta permeabilidad en la roca caja que permite la transferencia y circulación de fluidos.

4.4.5. Evidencias y Pesos.

En esta investigación se toman como referencia los pesos utilizados en el estudio de Lindsey et al (2021) siendo recalculados, con el fin de ajustar los valores a los datos disponibles en el modelo propuesto (tabla 6). Tal como se indico anteriormente, se subdivieron y categorizaron las evidencias por aparte debido a su importancia relativa en el modelo y debido a sus características como evidencias múltiples que favorecen la presencia del recurso. Siendo así, y en términos de importancia se asignaron los siguientes pesos a las evidencias en mención: i) Evidencias de calor con un peso del 32,9%, ii) Evidencias de permeabilidad y manifestaciones termales ambas con un peso del 24,7%, y iii) Evidencias de fluidos con un 17,7%.

Tabla 6

Pesos aplicados a las capas de evidencia, los valores fueron tomados como referencia desde el trabajo de Lindsey et al., 2021 y adaptados al modelo.

Peso (%)		Capa de evidencia	Peso (%)
32,9	Evidencias de Calor	Unidades volcánicas recientes	12,3
		Temperatura Superficial	20,5
17,7	Evidencias de Fluido	Alteraciones hidrotermal	16,4
		Distancia a lagos	1,4
24,7	Evidencias de permeabilidad	Densidad de lineamientos mayores y menores	11,0
		Distancia a fallas	13,7
24,7	Manifestaciones termales	Densidad de manifestaciones termales	24,7
			100

5. Resultados

El procesamiento y análisis producto del procesamiento de los insumos discutidos anteriormente, dio como resultado: i) Estimación y creación de una capa promediada de Temperatura del Suelo, ii) Extracción y análisis de estructuras geológicas como lineamientos, iii) Caracterización de principales minerales de alteración hidrotermal, iv) Construcción de un modelo multicriterio con base en el modelo índice propuesto por Gupta et al (2017) y Lindsey et al (2021).

5.1. Temperatura Superficial

El procesamiento de las imágenes térmicas permitió derivar tres series de tiempo que fueron agrupadas como se muestra en el apéndice D. En el anexo los productos que están resaltados con color azul hacen referencia a que fueron creados usando el promedio de 18 imágenes (18mean), los rojos hacen referencia el promedio de 50 escenas (50mean), y la combinación de azules y rojas son el total de escenas usadas que corresponden a 68 escenas (68mean) (Figura 21).

Figura 21

Mapas de temperatura superficial en °C. a. Banda promedio con 68 imágenes, suma de las imágenes resaltadas en rojo y azul (Apéndice F) b. banda promedio con 18 imágenes c. banda promedio de 50 imágenes

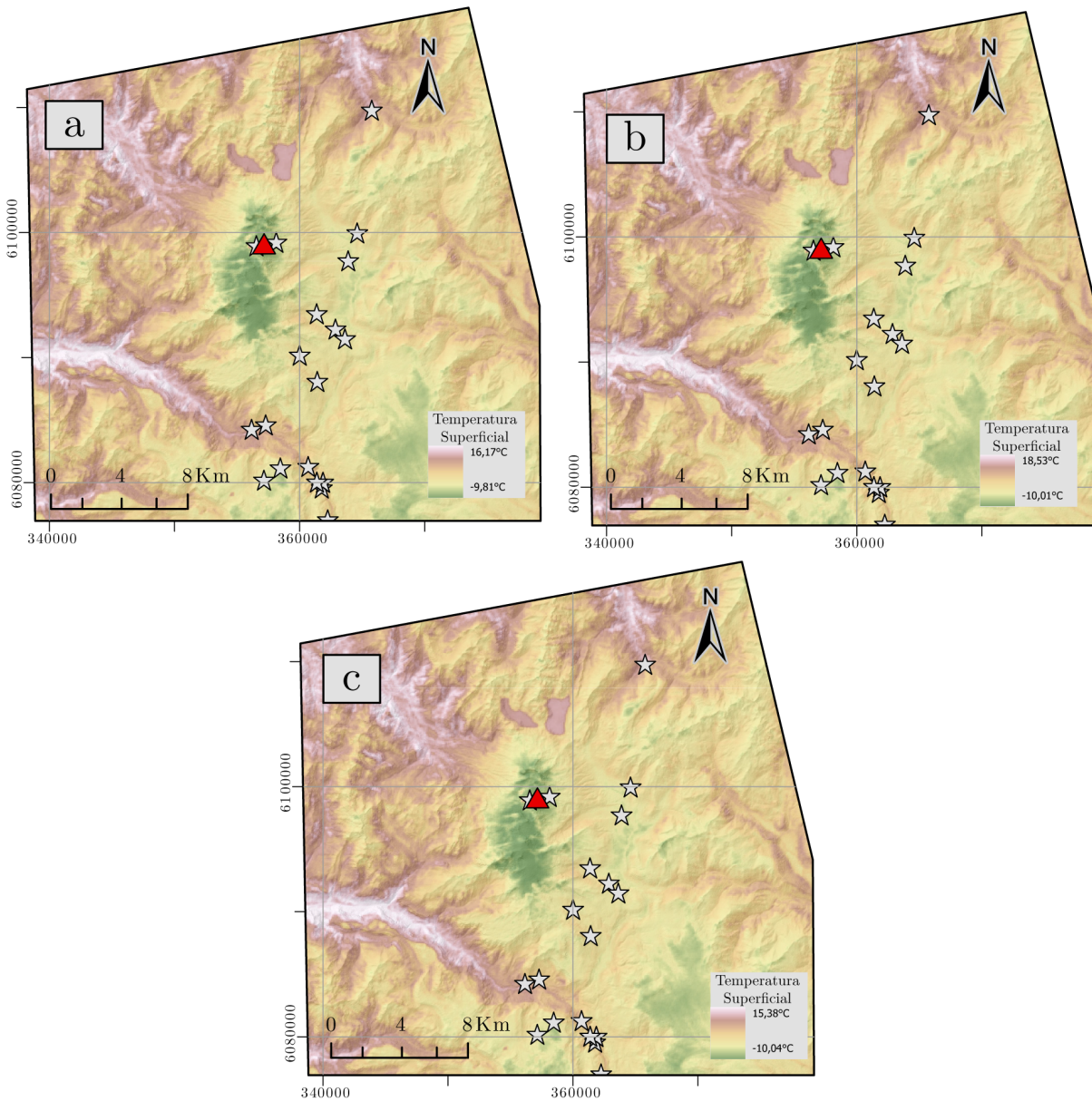


Tabla 7

Estadística para los pixeles de las bandas promedio n=numero de pixeles, P90= Percentil 90, P10= Percentil 10

Capa	n	Area Km	Min	Max	Rango	Media	D. Est	Suma	Mediana	P90	P10
68prom	148932	1553,79	-9,81	16,17	25,98	2,44	4,04	364325,2	1,83	8,44	-2,14
50prom	146349	1553,79	-10,03	15,38	25,42	1,99	4,05	291113,1	1,36	8,03	-2,59
18prom	149211	1553,79	-10,01	18,53	28,53	3,57	4,27	532482,1	2,96	9,86	-1,35

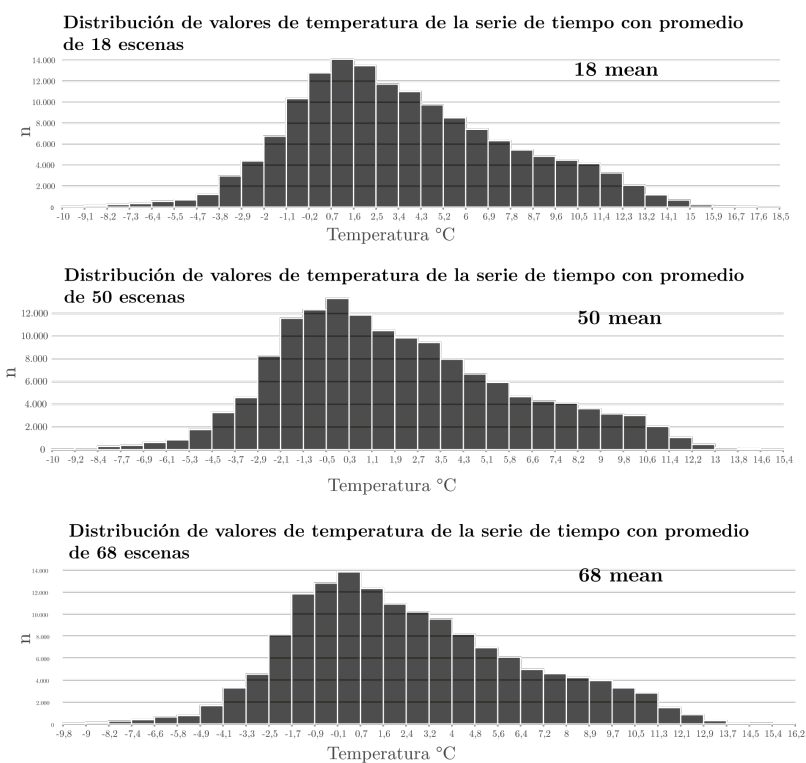
Los tres productos promediados de temperatura muestras sobre el CVPP temperaturas que son similares y se observan patrones suaves y sobre el área, las zonas que poseen mayor temperatura de superficie se relaciona con zonas descubiertas de vegetación aledañas a la red del drenaje. De la misma manera sobre los cuerpos de agua, por ejemplo en Las lagunas Teno se observa un comportamiento constante en los valores de temperatura con valores que oscilan entre 10 y 11°C, al igual que en las lagunas cratéricas dentro del cono volcánico donde la temperatura del agua se comporta de la misma manera. Contrariamente, los bajos valores de temperatura asociada a las zonas más altas y cimas de las estructuras volcánicas corresponden a valores de -8 y -10 °c asociado con coberturas de tipo glaciar.

Los rangos dinámicos de los valores de temperatura fueron desde los 18,5°C y -10°C (tabla 7), correspondientes a la imagen promedio de 18 y la temperatura alta mas baja registrada se captó en la capa promedio de 50 con 15,4 °C. La imagen promedio de 68 es donde la distribución de los píxeles fue más homogénea. Cabe resaltar que la temperatura media más alta corresponde a la capa promedio de 18 mean, en la que se observa también la frecuencia (aproximadamente 14.000 píxeles) de temperatura más alta (0,7 – 1,6 °C). En los histogramas (Figura 22) la representación de los datos se muestra con un ligero sesgo hacia la derecha, lo que indica que a mayor tempera-

tura superficial, la frecuencia de píxeles disminuye, y los datos inusuales o atípicos se encuentran representados por los picos mas altos y mas bajos (-10°C y 18,5°C) donde están presentes a muy baja frecuencia.

Figura 22

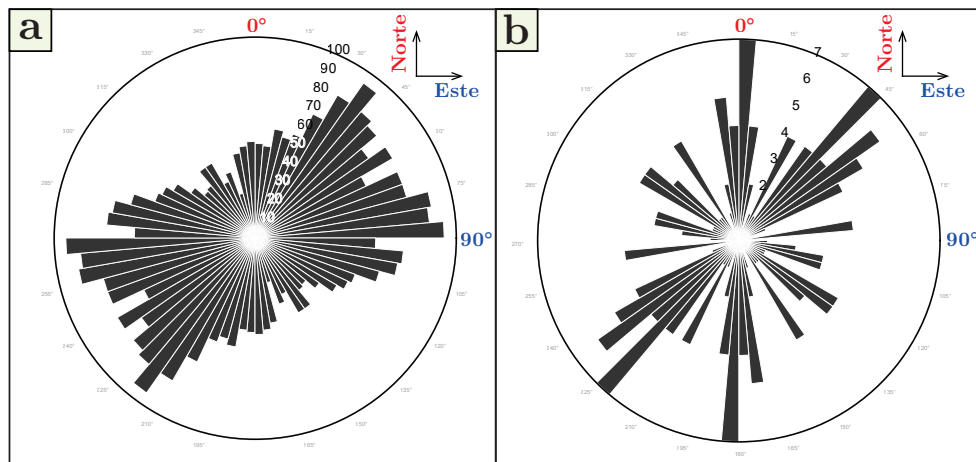
Histogramas de las capas de temperatura. n=numero de píxeles



5.2. Lineamientos Estructurales

Figura 23

Distribución de rumbos de los lineamientos representados por diagramas de rosas a. lineamientos menores b. lineamientos mayores.



Mediante el enfoque semiautomático se pudo realizar la caracterización de 3314 lineamientos morfoestructurales, de ellos 94 son de gran magnitud (lineamientos mayores) con distancias entre los 683m hasta 16040m y 3220 de formas comparablemente reducidas en longitud (lineamientos menores) que entre los 404,5m hasta los 532m (Figura 24) con rango de variación menor. Los lineamientos morfoestructurales interpretados y detectados automáticamente, tienden a direcciones NE-SW y E-W, poseen una longitud total de lineamientos de 472.344 m y 1.491.469 m respectivamente (Figura 23).

En el diagrama de rosas de los lineamientos menores existen dos tendencias marcadas donde se acumulan alrededor de 520 unidades (cerca del 16% de las muestras), orientadas con rumbos entre 30° y 40°(NE-SW), junto con direcciones de 80 y 90°(E-W), de manera similar ocurre con

Figura 24

Lineamientos menores y mayores caracterizados en el área de estudio

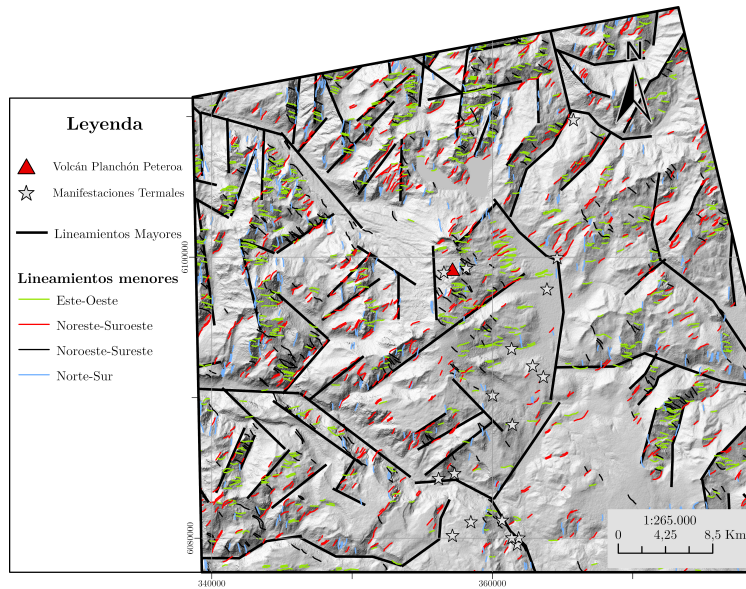


Tabla 8

Estadística de datos de lineamientos, donde l = longitud del lineamiento en metros y n = numero de lineamientos

	Manuales		Automáticos	
	l (m)	Rumbo	l (m)	Rumbo
n	94		3220	
min	683	103	1,9	1
max	16040	285	1879	360
prom	5024,9	197,1	463,2	180,2
St. Dev	2584,8	47,7	219,4	91,9
media	4873,1	205,6	399,2	198,8
suma	472344	18524,5	1491469	580314
rango	15356,6	182,3	1877,1	360
rango intercuartil	2989,4	65	207	155,8
1Q	3118	166,6	321,3	98,4
3Q	6107,4	231,5	528,3	254,2
C.variación	0,51	0,24	0,47	0,51
Skewness	1,4	-0,13	2,15	-0,136
Kurtosis	6,5	2,1	9,6	1,93

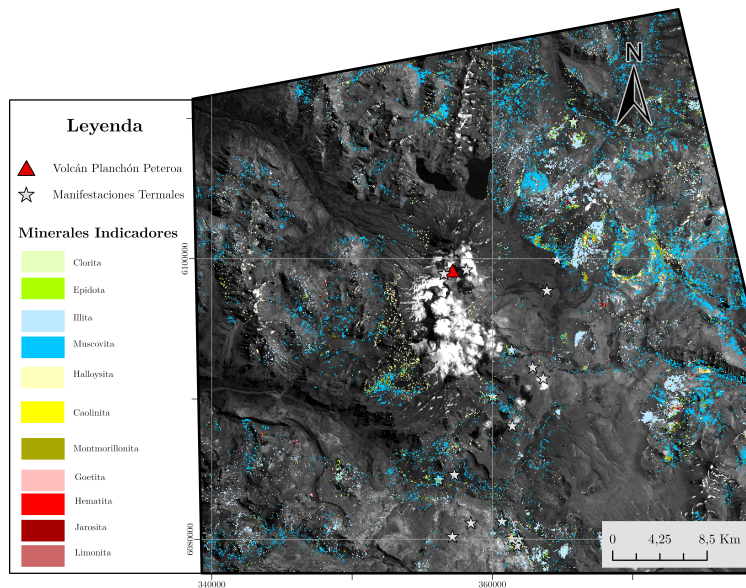
los lineamientos mayores, donde en su mayoría se encuentran en dirección 0 a 10° (N-S) y en un rango de 40 a 50°.

Los lineamientos mayores y los lineamientos menores tienen de rumbo promedio 197,1 y 180,2 respectivamente (tabla 8).

5.3. Mapeo Mineralógico

Figura 25

Minerales indicadores de potencial geotérmico detectados por Spectral Angle Mapper (SAM)



Se logró identificar y caracterizar sobre la zona de estudio un área de $5,28 \text{ Km}^2$ que presentan la presencia de mineralogías indicadores de un ambiente geotérmico (Figura 25). Las zonas sin información corresponden a máscaras que fueron usadas para aislar coberturas como glaciares, nubes, agua, sombras y vegetación, que se ubican al rededor del cono volcánico Planchón-Peteroa y hacia el oeste del mapa.

Los minerales indicadores más representativos son la muscovita en primer lugar con 80.607 píxeles detectados y seguido por la illita con 50.034 y entre ellos suman 130641 píxeles detectados (tabla 9). Seguido se encuentra grupo mineral argílica, con minerales arcillosos como Halloysita

y Montmorillonita. Y por último los minerales menos representativos son del grupo de óxidos de hierro, pues el área detectada suma 88680 m².

Tabla 9

Pixeles de minerales indicadores clasificados por el algoritmo SAM

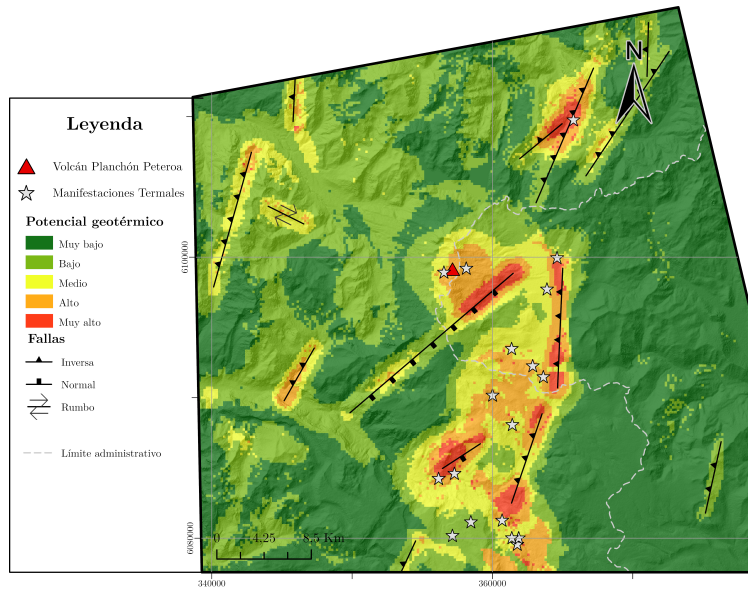
Minerales	n	área m²
Illita	50.034	1.501.020
Muscovita	80.607	2.418.210
Clorita	511	15.330
Epidota	6.590	197.700
Halloysita	20.395	611.850
Caolinita	46	1.380
Montmorillonita	14.119	423.570
Goetita	810	24.300
Hematita	96	2.880
Jarosita	1.993	59.790
Limonita	570	17.100
Total	pixeles	área Km ²
	175.771	5,3

5.4. Modelo de análisis espacial para delimitar zonas con potencial geotérmico

Los resultados de la integración de las evidencias de temperatura, permeabilidad y fluidos mediante análisis espacial permitió generar una capa de potencial geotérmico para el área de estudio. Sobre el polígono de análisis en inmediaciones del CVPP en términos generales la categoría que predomina corresponden al de potencial muy bajo con un 48,9% de representación, la categoría de bajo potencial corresponden al 31% y la suma de los potenciales medio alto y muy alto corresponden al 19% (tabla 10). La distribución espacial de esta última se da principalmente con una tendencia estructural de dirección NE-SW, relacionado con la capa de densidad de manifestaciones y densidad de lineamientos. Por último hacia el noroeste se exhiben tres áreas de alto potencial en forma

Figura 26

Modelo de análisis espacial para delimitar zonas con potencial geotérmico.



de línea recta o de bastón, esta forma se adquiere debido a la importancia de la capa de evidencia distancia euclidiana de fallas (Figura 20).

Tabla 10

Área de los valores del modelo.

	área Km ²	%
Muy bajo	761,4442	48,96464
Bajo	496,403	31,92117
Medio	168,203	10,81629
Alto	97,81052	6,289701
Muy alto	31,22936	2,008203
Total	1555,09	100

6. Análisis de Resultados

El volcanismo activo a lo largo de los Andes ha sido sitio de gran interés para la exploración de recursos geotérmicos debido a su configuración tectónica, circulación de fluidos y flujo calorífico cercano a superficie. El CVPP se asocia a un sistema volcánico activo que se ubica hacia la parte norte de la TZVS, y se clasifica como un sistema geotérmico ígneo joven, según la clasificación de sistemas geotérmicos de Goff y Janik (2000), donde las aguas meteóricas percolan a profundidad y son calentadas por la conducción térmica de los cuerpos intrusivos. Las manifestaciones termales se ubican al este del cono volcánico debido a la topografía, gradiente hidrológico y permeabilidad (Zolezzi, 2010), siendo estas localizaciones concordantes con las zonas de descarga (outflow) de un modelo geotérmico de un estratovolcán (Goff and Janik, 2000), y una de las evidencias más relevantes de la presencia de un sistema geotérmico volcánico.

A partir de las series de tiempo se observan valores de temperatura con distribuciones similares a través del tiempo, la distribución de los datos tiene un sesgo a la derecha y con valores máximos variables en cada set de datos. La distribución de los valores de temperatura son coherentes con trabajos realizados por (Forte et al., 2022) quienes mediante estaciones meteorológicas estudian la temperatura ambiente en zonas aledañas al CVPP y observan valores medios de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura con valores máximos en el mes de julio con temperaturas máximas entre $12\text{-}14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las series de tiempo también permitieron identificar anomalías térmicas constantes que pudiesen funcionar como áreas de constante emisión de calor a nivel de la superficie.

La distribución espacial de los patrones de alta temperatura se ubican principalmente hacia

el oeste de la estructura volcánica y se relacionaron espacialmente en dirección a los lineamientos mayores prevalentes en la zona (Figura 24). Estas altas temperaturas también se distribuyeron sobre áreas de cobertura vegetal, según lo relacionado con la figura 3 lo que puede indicar que a nivel de geobotánica, estas cubiertas pueden estar favorecidas por el estrés térmico debido a flujos de calor hacia la superficie, lo que puede llegar a afectar su estado fenológico, y constituirse como otro indicador de probabilidad geotérmica en la zona (Gupta, 2017). Esto debido a que la vegetación sana puede verse afectada por la acción de manifestaciones termales que junto al transporte y circulación de agua caliente, aumento de acidez de los suelos y emisiones de gases, pueden llegar a condicionar la salud de las coberturas vegetales (van der Meer et al., 2014; Elmarsdóttir et al., 2015). Por otro lado, lagunas cratéricas del CVPP reflejaron valores entre los 10 y 11 °C, al igual que las Lagunas Teno. Estos rangos de temperatura se consideran anomalías térmicas con base en el contexto térmico del área de estudio, ya que, representa un valor alto respecto a la temperatura promedio y habitual del área circundante (*background*). En relación a los lineamientos morfoestructurales generados mediante el enfoque semiautomático y mediante la interpretación visual, los dos enfoques generaron resultados distintos pero complementarios. Por lo menos, en cuanto a la distancia se observan grandes diferencias entre los dos enfoques ya que el uno es más sensitivo a lineamientos cortos, contrario a el enfoque visual en el que la visión sinóptica y el contexto de asociación espacial permite inferir trazos más largos y continuos sobre las estructuras delineadas.

Es por esto, que se agruparon los dos tipos de lineamientos en un mapa de densidad de lineamientos por Km^2 , en donde se pueden observar altas densidades sobre la zona oeste y norte del edificio volcánico, región caracterizada por otros autores como zonas con altos niveles de

deformación geológica. Los lineamientos mayores presentaron una relación espacial muy marcada con las manifestaciones termales superficiales, esto posiblemente a que las discontinuidades puede funcionar como conductos por las que pueden ascender fluidos calientes (van der Meer et al., 2014) (Figura 24), La tendencia de las manifestaciones y los lineamientos mayores se identificó en dirección NE-SW al este del cono volcánico principal, siguiendo la tendencia estructural que predomina sobre todo el área de estudio.

En cuanto a los minerales indicadores en el área de estudio se observa que la muscovita se distribuye de dos maneras, en la primera se distribuyen en forma de cluster y suele estar en cercanía de illita y minerales del grupo mineral de alteración argílica, principalmente se ubica hacia el este y la segunda es que se encuentra diseminada en el mapa (Figura 25), la muscovita relaciona espacialmente con las unidades rocas volcánicas y volcanoclásticas del cretácico-eoceno, y rocas calizas, yesos y tobas del jurásico, según unidades reportadas en Vigide et al (2020). El segundo mineral más representativo es la illita y se acumula en áreas definidas, principalmente al este del área de estudio. También se observan píxeles esparcidos de alteración argílica rodeando el cono volcánico en la parte oeste y algunos en formas lineales al este, por otra parte, los píxeles del grupo de los óxidos difícilmente se observan un grupo de píxeles al oeste del volcán entre 260 y 270° W, a demás este fue el grupo de alteración que menos fue detectado con 3.469 píxeles. En abundancia de lavas basálticas se esperaría mayor participación del grupo de óxidos de hierro, esto puede estar relacionado con los picos de absorción de los minerales del grupo de los óxidos y el espectro en el que ASTER adquiere información. Por esto, estudios previos proponen usar datos del sensor ETM+ para la identificación de estos minerales (Galvão et al., 2005; Ranjbar, 2011; Govil et al.,

2018). En general hacia el este del cono volcánico Planchón-Peteroa es donde mejor se definen los minerales indicadores de un ambiente geotérmico y hacia el oeste se encuentran los píxeles detectados en forma dispersa.

El modelo de análisis espacial final, sirvió como integrador de las diferentes capas geoespaciales creadas en el desarrollo de este proyecto. El modelo de análisis de índice permitió a partir de la integración de variables y evidencias que controlan la presencia de este recurso, la demarcación de píxeles que fueron agrupados bajo categorías que describen cualitativamente el potencial probable de la presencia de este recurso. La implementación de la técnica exploratoria Play Fairways Analysis permitió delimitar y cuantificar según categorías cualitativas el potencial geotérmico asociado a cada zona dentro del área de estudio. Como se observa en la figura 28 al integrar las zonas de potencial medio, alto y muy alto se pueden apreciar un patrón o tendencia relacionado a la localización espacial de los mismos.

En la zona central del área de estudio sobre el CVPP se observan valores de potencial medio, mientras que hacia la zona sur este de los edificios volcánicos se observan categorías muy altas debido a la coexistencia de deformación, de temperaturas mayores al promedio, manifestaciones superficiales como fumarolas y termales que generan expresiones superficiales como alteraciones de tipo hidrotermal.

La forma en la que los píxeles se agrupan se relaciona con la importancia de la localización de un sistema geotérmico ígneo joven, que esta dado por el peso de las evidencias, siendo las manifestaciones termales, evidencias de permeabilidad y evidencias de calor las que se acumulan al este del cono volcánico principal, donde es evidente la disposición casi recta en dirección NE-SW

de las zonas de potencial alto y muy alto relacionado con la zona de influencia de las principales estructuras geológicas. Además, es coherente con las direcciones preferenciales propuestas por estudios previos (Zolezzi, 2010; Vigide et al., 2020).

7. Conclusiones

Los sensores remotos y las herramientas digitales como los sistemas de información geográfica se conjugan para producir capas de evidencia en los cuales es posible medir parámetros como, temperatura superficial, lineamientos estructurales y categorizar composición mineralógica, estos junto con capas de evidencia adicionales, demuestran relación de posición con un sistema geotérmico.

Se estiman temperaturas superficiales entre los -10°C y 18°C , además es posible muestrear las lagunas cratéricas con temperaturas entre los 10 y 11°C , y en zonas con alta vegetación entre los 14 y 16°C , lo que podría indicar zonas con alto flujo, calor y permeabilidad. La capa 68 promedio, fue la escogida para integrar en el modelo de análisis multicriterio como evidencia base, en las evidencias de temperatura.

La detección de lineamientos en productos de radar Sentinel-1, muestra una tendencia de orientación de lineamientos en dirección NE-SW. Los trazos de lineamientos mayores y menores se combinan para generar la capa de densidad de lineamientos, insumo de evidencias de permeabilidad en el modelo. Adicionalmente es posible establecer una relación espacial con la ubicación de manifestaciones termales, pues se distribuyen en dirección NE-SW al cono volcánico principal, al igual que los lineamientos mayores de la parte este del cono.

Se logró caracterizar satisfactoriamente estos grupos de alteración mineral en el área de estudio utilizando imágenes ASTL1T_v003, aplicando el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper)

y usando firmas espectrales del laboratorio de firmas espectrales del USGS, como referencia para la identificación mineral. Según la geología del CVPP, Finalmente, los patrones de píxeles identificados como minerales de alteración se integran al modelo, como evidencia de fluido hidrotermal.

El modelo de análisis espacial para delimitar zonas con potencial geotérmico, fue el resultado del análisis multicriterio, después de integrar capas derivadas de productos satelitales ASTERL1T, ASTER08 y Sentinel-1, junto con información geoespacial secundaria recopilada (mapa geológico, fallas, manifestaciones termales) y posteriormente digitalizada. En el modelo es posible encontrar zonas con muy alto potencial, alto, medio, bajo y muy bajo, conforme en las evidencias geológicas de temperatura, fluido hidrotermal y permeabilidad.

Finalmente, se propone la metodología para la construcción de modelos de zonas con potencial geotérmico, que variaría de cada zona de estudio, según la disponibilidad de productos satelitales e información geográfica disponible. Entender de un sistema geotérmico y precisar alguna fuente termal prospectiva requiere de etapas de exploración en campo, con información geofísica, geoquímica, de roca, que permita desarrollar un modelo con mas detalle donde se pueda brindar una probabilidad. Toda esta información debe ser verificada con datos de campo, sin embargo la aplicación de tecnologías de información geográfica refleja que por medio de un estudio pre-exploratio, o previo a campo es posible precisar áreas de interés, optimizando el flujo de trabajo y haciendo mas objetivo el trabajo en campo. Adicionalmente las técnicas realizadas representan un

costo económico en comparación con métodos exploratorios tradicionales.

8. Recomendaciones

Se recomienda para la delimitación más detallada de las áreas con mayor potencial geotérmico integrar otras fuentes de información que incluyan datos geofísicos como datos de resistividad, datos geológicos detallados de las unidades aflorantes, y series temporales de temperatura con sensores remotos que abarquen periodos más amplios.

Para la generación de las variables de evidencia de permeabilidad para el modelo de idoneidad se recomienda el uso de fuentes de información de mayor resolución que podrían incluir imágenes ópticas de Spot, Planet para generar mapas detallados de estructuras geológicas de superficie que permitan detallar este criterio.

Para la generación de la variable de evidencia de fluidos se recomienda el uso de productos como WorldView3 que debido a su resolución espectral permitiría refinar y complementar el espectro de análisis alcanzado por las imágenes ASTER.

Para la generación de la variable de evidencia de fuente de calor se recomienda el uso de variables de temperatura en conjunto con la variable de flujo de calor radiativo, el cual puede ser derivado a partir de datos de temperatura de superficie creados con teledetección.

En la identificación de minerales de alteración se recomienda usar métodos de clasificación como LS-Fit (*Least Squares Fitting*), MNF (*Minimum Noise Fraction*) o SFF(*Spectral Feature Fitting*), que al igual que el método SAM, son basados en las firmas espectrales para el reconocimiento mineral. Del mismo modo es posible usar como insumo base otros productos ópticos.

Para la extracción de lineamientos estructurales, a partir de este trabajo se evidenció que

el enfoque de análisis híbrido basado en la extracción semiautomática con tareas de depuración y control de calidad se hace necesario debido a que el algoritmo de extracción usado es sensitivo a cambios de la frecuencia espacial en la imagen los cuales no siempre son relacionados con estructuras geológicas, por ende identifica elementos lineales de tipo antrópico.

Se recomienda aplicar este tipo de metodología de análisis espacial sobre otro tipo de sistemas geotermales, como sistemas geotérmicos conductivos en cuencas sedimentarias en las que se cuenten con las variables necesarias para la implementación de este tipo de modelos.

Existen diferentes métodos de integración de datos para predecir un valor o clasificar una zona, se recomienda probar con métodos geoestadísticos como lógica difusa, pesos de evidencia o incluso inteligencia artificial, teniendo en cuenta la estadística de las capas base.

Referencias Bibliográficas

- Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M., and Bachaoui, E. M. (2017a). Comparison of landsat-8, aster and sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of sidi flah-bouskour inlier, moroccan anti atlas. *Advances in Space Research*, 60(11):2355–2367.
- Adiri, Z., Harti, A. E., Jellouli, A., Lhissou, R., Maacha, L., Azmi, M., Zouhair, M., and Bachaoui, E. M. (2017b). Comparison of landsat-8, aster and sentinel 1 satellite remote sensing data in automatic lineaments extraction: A case study of sidi flah-bouskour inlier, moroccan anti atlas. *Advances in Space Research*, 60:2355–2367.
- Alexander Ritcher (2019). <https://www.thinkgeoenergy.com/>.
- Aravena, D., Muñoz, M., Morata, D., Lahsen, A., Parada, M. Á., and Dobson, P. (2016). Assessment of high enthalpy geothermal resources and promising areas of chile. *Geothermics*, 59:1–13.
- Azizi, H., Tarverdi, M., and Akbarpour, A. (2010). Extraction of hydrothermal alterations from aster swir data from east zanjan, northern iran. *Advances in Space Research*, 46(1):99–109.
- Bataille, C., Waisman, H., Colombier, M., Segafredo, L., and Williams, J. (2016). The deep decarbonization pathways project (ddpp): insights and emerging issues.

- Benavente Zolezzi, Ó. M. (2015). Origen y naturaleza de los fluidos de los sistemas volcánicos e hidrotermales activos de los andes de Chile central (32.5-36 s).
- Benderitter, Y. and Cormy, G. (1990). Possible approach to geothermal research and relative costs. *Small geothermal resources: A guide to development and utilization, UNITAR, New York*, pages 59–69.
- Boles, M. and Cengel, Y. (2014). An engineering approach. *New York: McGraw-Hill Education*.
- Browne, P. (1970). Hydrothermal alteration as an aid in investigating geothermal fields. *Geothermics*, 2:564–570.
- Browne, P. (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. *Annual review of earth and planetary sciences*, 6(1):229–248.
- Cembrano, J. and Lara, L. (2009). The link between volcanism and tectonics in the southern volcanic zone of the Chilean Andes: a review. *Tectonophysics*, 471(1-2):96–113.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. CRC press.
- Conde, A. and Johannis, P. E. (2021). Geotermia en Argentina: Estado, áreas de interés, potencial.
- COP21 (2015). United Nations Framework Convention on Climate Change, Conference of the Parties 21.

- Davidson, J. P., Dungan, M. A., Ferguson, K. M., and Colucci, M. T. (1987). Crust-magma interactions and the evolution of arc magmas: The san pedro–pellado volcanic complex, southern chilean andes. *Geology*, 15(5):443–446.
- Elders, W., Bird, D., Williams, A., and Schiffman, P. (1984). Hydrothermal flow regime and magmatic heat source of the cerro prieto geothermal system, baja california, mexico. *Geothermics*, 13(1-2):27–47.
- Elders, W. and Moore, J. (2016). Geology of geothermal resources. *Geothermal Power Generation*, pages 7–32.
- Elmarsdóttir, Á., Vilmundardóttir, O. K., and Magnússon, S. H. (2015). Vegetation of high-temperature geothermal areas in iceland. In *Proceedings of the World Geothermal Congress*, pages 1–11.
- ESA (2021). Recurso web tomado de european space agency, recuperado de <https://www.esa.int/>.
- Faulds, J. E., Brown, S., Coolbaugh, M., DeAngelo, J., Queen, J. H., Treitel, S., Fehler, M., Mlawsky, E., Glen, J. M., Lindsey, C., et al. (2020). Preliminary report on applications of machine learning techniques to the nevada geothermal play fairway analysis. In *45th workshop on geothermal reservoir engineering*, pages 229–34.
- Forte, P., Ramires, A., De Abrantes, L., Llano, J., Dominguez, L., Carbajal, F., García, S., Sruoga, P., and Bonadonna, C. (2022). La erupción no será transmitida: características, impactos

y asistencia durante el ciclo eruptivo 2018-2019 del volcán peteroa, argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 79(1):47–71.

Foum (2018). An introduction to play fairway evaluation. recuperado de <https://www.linkedin.com/pulse/introduction-play-fairway-evaluation-pfe-alan-foum>.

Galvão, L. S., Almeida-Filho, R., and Vitorello, I. (2005). Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using aster short-wave infrared bands: Evaluation in a tropical savannah environment. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 7(2):107–114.

Giambiagi, L. B., Ramos, V. A., Godoy, E., Alvarez, P. P., and Orts, S. (2003). Cenozoic deformation and tectonic style of the andes, between 33 and 34 south latitude. *Tectonics*, 22(4).

Gillespie, A., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothern, J. S., Hook, S., and Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (aster) images. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 36(4):1113–1126.

Gischler, Perks Matthew, G. T. C. C. C. A. R. H. M. G. F. J. S. G. (2020). *Capturando el potencial geotérmico en América Latina y El Caribe: Una perspectiva del camino a seguir*, volume 1. BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO, BID.

Glassley, W. E. (2014). *Geothermal energy: renewable energy and the environment*. CRC press.

Goff, F. and Janik, C. J. (2000). Geothermal systems. *Encyclopedia of volcanoes*, 2000:817–834.

Govil, H., Gill, N., Rajendran, S., Santosh, M., and Kumar, S. (2018). Identification of new base metal mineralization in kumaon himalaya, india, using hyperspectral remote sensing and hydrothermal alteration. *Ore Geology Reviews*, 92:271–283.

Guerrero et al. (1918). Exploración geotérmica con sig en maguarichic, chihuahua.

Gupta, R. P. (2017). *Remote sensing geology*. Springer.

Gutiérrez, F. J., Lemus, M., Parada, M. A., Benavente, O. M., and Aguilera, F. A. (2012). Contribution of ground surface altitude difference to thermal anomaly detection using satellite images: Application to volcanic/geothermal complexes in the andes of central chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 237:69–80.

Guzmán, J. S., López, L. S., and Robles, L. O. (2011). Evaluación del potencial de energía geotérmica. *Estudio Técnico PER*, 2020:2011.

Hanson, P. (2020). Geothermal country overview: Guatemala. 2020.

Harris, A. (2013). *Thermal remote sensing of active volcanoes: a user's manual*. Cambridge university press.

Haselwimmer, C. and Prakash, A. (2013). Thermal infrared remote sensing of geothermal systems. In *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*, pages 453–473. Springer.

Hildreth, W., Grunder, A. L., and Drake, R. E. (1984). The loma seca tuff and the calabozos caldera:

- A major ash-flow and caldera complex in the southern andes of central Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 95(1):45–54.
- Hochstein, M. P. (1988). Assessment and modelling of geothermal reservoirs (small utilization schemes). *Geothermics*, 17(1):15–49.
- Holbik, S. P. (2014). Arc crust-magma interaction in the andean southern volcanic zone from thermobarometry, mineral composition, radiogenic isotope and rare earth element systematics of the azufre-planchon-peteroa volcanic complex, Chile.
- Hunt, G. R. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, 42(3):501–513.
- Internacional Energy Agency (2021). <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, Mayo de 2021.
- Joseph, G. (2005). *Fundamentals of remote sensing*. Universities Press.
- Kodama, S., Takeda, I., and Yamaguchi, Y. (2010). Mapping of hydrothermally altered rocks using the modified spectral angle mapper (msam) method and aster swir data. *International Journal of Geoinformatics*, 6(1):41.
- Lautze, N., Thomas, D., Ito, G., Frazer, N., Martel, S., Hinz, N., and Whittier, R. (2018). Review of the Hawaii play fairway phase 2 activities. In *Proceedings: 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*, pages 12–14.

- Lindsey, C. R., Ayling, B. F., Asato, G., Seggiaro, R., Carrizo, N., Larcher, N., Marquetti, C., Naón, V., Serra, A. C., Faulds, J. E., et al. (2021). Play fairway analysis for geothermal exploration in north-western argentina. *Geothermics*, 95:102128.
- Littlefield, E. F. and Calvin, W. M. (2014). Geothermal exploration using imaging spectrometer data over fish lake valley, nevada. *Remote Sensing of Environment*, 140:509–518.
- Macharia, M. W., Gachari, M. K., Kuria, D. N., and Mariita, N. O. (2017). Low cost geothermal energy indicators and exploration methods in kenya.
- Markham, B. L., Arvidson, T., Barsi, J. A., Choate, M., Kaita, E., Levy, R., Lubke, M., and Masek, J. G. (2018). Landsat program.
- Meneses, P. R. and Almeida, T. d. (2012). Introdução ao processamento de imagens de sensoria-mento remoto. *Universidade de Brasília, Brasília*.
- Ministerio de Ambiente de Colombia (2020). <https://www.minambiente.gov.co/>, 2020.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021). <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/estrategia-2050//>, 2021.
- Ministerio de Minas y Energía (2021). <https://www.minenergia.gov.co/en/micrositios/enlace-ruta-hidrogeno/>, 2021.
- Morata, D., Aravena, D., Lahsen, A., Muñoz, M., and Valdenegro, P. (2020). Chile up-date: The

first south american geothermal power plant after one century of exploration. In *Proceedings World Geothermal Congress*, volume 1.

Mosolf, J. G., Gans, P. B., Wyss, A. R., Cottle, J. M., and Flynn, J. J. (2019). Late cretaceous to miocene volcanism, sedimentation, and upper-crustal faulting and folding in the principal cordillera, central chile: Field and geochronological evidence for protracted arc volcanism and transpressive deformation. *GSA Bulletin*, 131(1-2):252–273.

Muffler, P. and Cataldi, R. (1978). Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7(2-4):53–89.

Muñoz, J. and Stern, C. (1988). The quaternary volcanic belt of the southern continental margin of south america: Transverse structural and petrochemical variations across the segment between 38 s and 39 s. *Journal of South American Earth Sciences*, 1(2):147–161.

NASA (2021). Recurso web tomado de national aeronautics and space administration, recuperado de <https://www.nasa.gov/>.

Nicholson, K. (2012). *Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques*. Springer Science & Business Media.

Paucara, V., Pajuelo Aparicio, D., and Yupa Paredes, G. R. (2019). Caracterización de los sistemas geotermales asociados a los volcanes activos ubinas y huaynaputina, región moquegua-[boletín b 60].

- Ramli, M., Yusof, N., Yusoff, M., Juahir, H., and Shafri, H. (2010). Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. *Bulletin of engineering Geology and the Environment*, 69:215–233.
- Ranjbar, H. (2011). Application of spectral analysis in mapping hydrothermal alteration of the northwestern part of the kerman cenozoic magmatic arc, iran. *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 22(3):221–238.
- Rinehart, J. S. (1980). *Geysers and geothermal energy*, volume 223. Springer.
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow III, W. R., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., Huckestein, B., et al. (2020). Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied energy*, 266:114848.
- Ritcher, A. (2020). Recurso web tomado de think geoenergy, recuperado de <https://www.thinkgeoenergy.com/geothermal/an-overview-of-geothermal-resources/>.
- Sedrette, S. and Rebai, N. (2016). Automatic extraction of lineaments from landsat etm+ images and their structural interpretation: Case study in nefza region (north west of tunisia). *Journal of Research in Environmental and Earth Sciences*, 4(2016):139–145.
- Sruoga, P. (2008). El volcán planchón-peteroa. un modelo para armar.
- Stern, C. R. (2004). Active andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista geológica de Chile*, 31(2):161–206.

- Suárez, C. A., Toyos, G., Candela-Becerra, L. J., and Agosto, M. (2021). Analysis of thermal anomalies at copahue volcano between october 2011 and the december 2012 eruption with modis. *Journal of South American Earth Sciences*, 110:103310.
- Tassara, A., Götze, H.-J., Schmidt, S., and Hackney, R. (2006). Three-dimensional density model of the nazca plate and the andean continental margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B9).
- Thannoun, R. G. (2013). Automatic extraction and geospatial analysis of lineaments and their tectonic significance in some areas of northern iraq using remote sensing techniques and gis. *International Journal Of Enhanced Research In Science Technology & Engineering Bulletin*, 2(2):1–11.
- Tormey (1989). *Geology and geochemistry of the active Azufre-Planchon-Peteroa volcanic center (3515'S, southern Andes): implications for Cordilleran arc magmatism*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Townend, J. and Zoback, M. (2004). Regional tectonic stress near the san andreas fault in central and southern california. *Geophysical Research Letters*, 31(15).
- Vaillancourt, K., Bahn, O., Frenette, E., and Sigvaldason, O. (2017). Exploring deep decarbonization pathways to 2050 for canada using an optimization energy model framework. *Applied Energy*, 195:774–785.
- van der Meer, F., Hecker, C., van Ruitenbeek, F., van der Werff, H., de Wijkerslooth, C., and

- Wechsler, C. (2014). Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 33:255–269.
- van der Zwaan, B. and Dalla Longa, F. (2019). Integrated assessment projections for global geothermal energy use. *Geothermics*, 82:203–211.
- Vigide, N., Yagupsky, D., Barcelona, H., Agosto, M., and Caselli, A. (2020). Structural analysis of the planchón-peteroa volcanic complex: Insights for the geothermal system. *Journal of South American Earth Sciences*, 104:102856.
- Wang, G., Song, X., Shi, Y., Yang, R., Yulong, F., Zheng, R., and Li, J. (2021). Heat extraction analysis of a novel multilateral-well coaxial closed-loop geothermal system. *Renewable Energy*, 163:974–986.
- Weng, Q. (2010). *Remote sensing and GIS integration*.
- Williams, C. F., Reed, M. J., and Anderson, A. F. (2011). Updating the classification of geothermal resources. In *Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, page 2011.
- Yalcin, M. and Gul, F. K. (2017). A gis-based multi criteria decision analysis approach for exploring geothermal resources: Akarcay basin (afyonkarahisar). *Geothermics*, 67:18–28.
- Zamyad, M., Afzal, P., Pourkermani, M., Nouri, R., and Jafari, M. R. (2019). Determination of hydrothermal alteration zones using remote sensing methods in tirka area, toroud, ne iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47:1817–1830.

Zolezzi, O. M. (2010). Actividad hidrotermal asociada a los complejos volcánicos planchón-peteroa y descabezado grande-quizapu-cerro azul, 35° sy 36°s, zona volcánica sur, chile.

Apéndices

Apéndice A. Conceptos de sensores remotos

y esta descrita por la ecuación 1, consiste en que el campo magnético y eléctrico son inseparables y son perpendiculares a la dirección de la propagación.

$$C = \lambda * f \quad (1)$$

Ecuación 1 para la Longitud de onda, donde C es la velocidad de la luz, f representa la frecuencia y lambda la longitud de onda.

Para la teoría de la REM como partícula fue planteada en principio por Max Planck, que postula que la radiación electromagnética está compuesta de numerosos paquetes de energía pequeños e indivisibles llamados fotones. La energía de un fotón puede ser escrita como:

$$E = h * f \quad (2)$$

Ecuación 2 para la relación Planck-Einstein. Donde E es la energía de un fotón en Joule, h es la constante de Planck y f representa la frecuencia, esto significa que los fotones de corta longitud de onda (o alta frecuencia) portan mayor energía que los de gran longitud de onda (baja frecuencia). La forma cuántica de la REM es exhibida cuando interactúa con materia a escala atómica y explica fenómenos de la radiación de cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico.

$$E = h * \left(\frac{C}{\lambda} \right) \quad (3)$$

Ecuación 3 donde E es la energía en joules, h es la constante de Planck, c velocidad de la luz y lambda longitud de onda

Apéndice B. Radiación de un Cuerpo Negro

La teoría de la radiación de un cuerpo negro teórico asume que un objeto o sistema con temperatura igual o superior a los 0° Kelvin, absorbe toda la energía que incide sobre él para luego emitirla como un emisor perfecto. Esta teoría es la base de la ley de radiación de Planck (ecuación 4), la cual permite cuantificar la radiación electromagnética total que emite un objeto considerado como un emisor perfecto (Gupta, 2017).

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 * \left[e^{\left(\frac{C_2}{\lambda * T} \right)} - 1 \right]} \quad (4)$$

Ecuación 4 Donde λ es la longitud de onda en μm , C1 es $3.741 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2 \text{ sr}$, y C2 corresponde a $1.438 \times 10^{-2} \text{ m K}$.

Apéndice C. Emisividad NEM y Algoritmo TES propuesto por Gillespie et al., 1998

El algoritmo TES reclasifica las imágenes para que no haya discontinuidades artificiales en el producto. Además, existe el método *Normalized Emissivity Method* (NEM) (ecuación 6) para estimación de temperaturas a partir de datos de radiancia obtenida por el sensor. Para el cálculo se debe asumir valores de $E_{\text{max}}=0.99$ para superficies de bajo contraste espectral como, agua, vegetación, nieve, entre otras y valores $E_{\text{max}}=0.96$ para superficies con altos contrastes (Gillespie

et al., 1998). Existe una diferencia entre los dos cálculos, pues TES calcula la temperatura cinética superficial terrestre (teniendo en cuenta fluctuaciones de temperatura) y a su vez los espectros de emisividad.

$$MMD = \text{máx}(\beta_b) - \text{mín}(\beta_b) \quad ; \quad b = 10 - 14$$

$$\varepsilon_{min} = 0,994 - 0,684 * MMD^{0,737} \quad ; \quad \varepsilon_b = \beta \left(\frac{\varepsilon_{min}}{\text{mín}(\beta_b)} \right) \quad ; \quad T = \frac{C_2}{\lambda_B} \left(\ln \left(\frac{C_1 \varepsilon_b}{\pi R_b * \lambda_b * R} + 1 \right) \right)^{-1} \quad (5)$$

Ecuación 7. Algoritmo TES (Temperature and emissivity separation), donde MMD = Diferencia mínima máxima, b=bandas espectrales 10 a 14 de ASTER, β y ε es el rango del espectro escalado a los valores de emisividad, ε comprende valores de ASTER, ε_{min} es la relación para predecir β_b , λ_b es la longitud de onda para la banda de ASTER con emisividad máxima, R corresponde a la radianza corregida atmosféricamente $c=1.52$.

$$T_k = T_b = \frac{C_2}{\lambda_B \ln \left(\frac{C_1}{M(\lambda, T)_B \lambda^5} + 1 \right)}, \quad T_{NEM} = mx(T_b), \varepsilon_b = \frac{M(\lambda, T)_B}{Mcn(\lambda, T)} \quad (6)$$

Ecuación 6 Algoritmo NEM (normalized emissivity method) para cálculo de temperatura cinética, donde $c1$ y $c2$ son constantes de la Ley de Planck, ε_b es usada para calcular R.

Apéndice D. Conceptos de sensores remotos

Los conceptos usualmente utilizados en teledetección para comprender los tipos de interacción de la energía con la superficie, la naturaleza de la radiación que llega al sensor y las magnitudes que finalmente puede registrar el sistema sensor en cada pixel son definidos (Gupta, 2017; Harris, 2013):

- **Absortividad:** Relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie
- **Ángulo Sólido:** Describe la convergencia o divergencia angular en tres dimensiones, del flujo de o hacia una superficie. El sensor satelital y la apertura de su sistema óptico miden la intensidad radiante que deja la superficie de área del terreno limitada por el ángulo sólido. Es medida por estéreo radian (sr)
- **Densidad de flujo radiante:** es el flujo de energía radiada hacía o desde una superficie por unidad de área de esa superficie por unidad de tiempo. Se expresa en (W/m^2)
- **Emisividad:** relación entre la radiancia emitida de una superficie (m) y la que ofrecería un emisor perfecto.
- **Energía radiante:** se define como energía que se propaga desde la fuente en forma de ondas electromagnéticas y se expresa en Julios.
- **Flujo radiante:** Es la energía total radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo y su magnitud se representa en Vatios (W)

- Irradiancia espectral: hace referencia cuando la energía (específica en longitud de onda) incide en una superficie horizontal en una determinada área por unidad de tiempo.
- Irradiancia: Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Describe la magnitud que mide el sensor, es normalmente medida en vatios sobre metro cuadrado (W/m^2)
- Radiancia emitida: Flujo radiante que deja una superficie por unidad de área de esa superficie. Su unidad de medida es (W/m^2)
- Radiancia espectral emitida: Es el Flujo radiante que deja una superficie por unidad de área, medida por unidad de longitud de onda. Su unidad de medida es ($W/m^2 \mu m$)
- Radiancia espectral: Total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Se expresa en ($W/m^2 sr\mu m$)
- Radiancia: Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Describe la magnitud que mide el sensor. Su unidad de medida es ($W/m^2 sr$)
- Reflectividad: es la relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie
- Transmisividad: Representa la relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie

Apéndice E. Obtener °C a partir de DN para múltiples imágenes ASTER08

Este código se ejecuto en Python, con la interfaz de ArcGIS Pro, con librerias arcPY. este código fue utilizado para la ejecución del preprocesamiento de las imágenes de temperatura superficial AST08_v003

```
#importar librerias
```

```
import arcpy
```

```
import os
```

```
from arcpy.sa import *
```

```
#definir espacio de trabajo y chequear extensiones
```

```
arcpy.env.workspace=r"D:\aster08_project\144_noche_015nubosidad"
```

```
workspace=arcpy.env.workspace
```

```
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
```

```
arcpy.env.overwriteOutput = True
```

```
#Definir el directorio de partida y ejecutar el ciclo
```

```
ws = r"D:\aster08_project\144_noche_015nubosidad\144"
```

```
walk = arcpy.da.Walk(ws,
```

```
topdown=True, datatype="RasterDataset", type="TIF")
```

```
#son el resultado de walk (Filenames hace referencia  
a los archivos en cada dir)  
for dirpath , dirnames , filenames in walk:  
    print ("Directorio_de_procesamiento:" , filenames)  
  
    for imagen_individual in filenames:  
        if imagen_individual.endswith('.tif'):  
  
            #hacer objetos raster para cada imagen  
            rutaimagen=('{}\\{}'.format(dirpath ,imagen_individual))  
            definirimagen=Raster(rutaimagen)  
  
            #guardar elementos seleccionados  
            nombre_imagen=imagen_individual[7:39]  
            dirsalida=(r"D:\aster08_project\TIFF_collected\{}.tif".  
            format(nombre_imagen))  
  
            definirimagen.save(directoriosalida)  
            print ("Copiando_imagen....")  
            print ("Imagen_guardada..")
```

```
else :  
  
    print ("Proceso_terminado")  
  
res=r"D:\aster08_project\144_noche_015nubosidad\TIFF_collected"  
walk2=arcpy.da.Walk(res ,topdown=True , datatype="RasterDataset")  
  
for dirpath , dirnames , filenames in walk2:  
  
    for imagenes in filenames:  
  
        #hacer objetos raster con cada imagen  
  
        imagenruta="{ }\{}".format( dirpath , imagenes )  
  
        objeto=Raster( imagenruta )  
  
        #transformación imágenes  
  
        escalado=objeto*0.1  
  
        celsius=escalado -273.15  
  
        #guardar imagen individual
```

```
nombreimagen=imagenes [7:39]

dircelsius=r"D:\aster08_project\{ }.tif" .format(nombre)

celsius .save(rutacelsius)

print (nombreimagen)
```

Apéndice F. Productos de temperatura superficial involucrados

El apéndice F corresponde a la información de los productos satelitales AST08_v003, insumos necesarios en la creación de la capa de evidencia de temperatura superficial. los colores rojos corresponden a los productos usados en 50 promedio y los azules 18 promedio, De manera que, Los valores resaltados en azul hacen referencia a los insumos utilizados para crear 18 mean, los de color rojo a los de 50mean, y tanto azules como rojos se usaron en 68mean.

Apéndice G. Anomalías Térmicas MODVOLC

El apéndice G muestra los valores recuperados desde el algoritmo de detección de anomalías térmicas superficiales desde imágenes MODIS, son también anomalías térmicas detectadas por el algoritmo MODVOLC. Las imágenes seleccionadas para la generar la capa 18 promedio se relacionan temporalmente con las fechas de detección. Temp es temperatura es Kelvin.

Año	Mes	Dia	Hora	Longitud	Latitud	Temp
2020	4	7	14	-70,756508	-35,322521	293,1
2020	4	7	5	-70,733528	-35,316086	278,7
2020	4	7	5	-70,740837	-35,316822	278,7
2020	4	7	5	-70,755089	-35,311661	278,7
2020	4	7	5	-70,762779	-35,312172	278,7
2020	4	6	18	-70,751427	-35,321812	297,5
2019	3	30	6	-70,763550	-35,276836	282,1
2016	4	11	6	-70,776825	-35,296963	279,5
2016	4	9	18	-70,768089	-35,301624	297,5
2014	1	21	18	-70,775436	-35,328388	308,1
2014	1	21	18	-70,777245	-35,319389	308,8
2014	1	21	18	-70,786423	-35,329987	308,1
2014	1	21	18	-70,788223	-35,320988	308,8
2013	10	12	18	-70,753006	-35,315498	295,3
2013	10	12	18	-70,767807	-35,317127	295,3
2013	3	28	19	-70,690437	-35,191406	305,8
2013	3	28	19	-70,700562	-35,188934	305,8
2012	4	19	18	-70,722115	-35,319500	296
2009	4	9	14	-70,745110	-35,319180	293,1
2009	4	9	14	-70,755974	-35,317635	293,1
2009	1	16	18	-70,762550	-35,326660	307,5
2005	4	9	18	-70,700325	-35,328644	296,8
2003	10	13	14	-70,760574	-35,311554	292,5
2000	10	18	3	-70,724449	-35,319706	272,3
2000	10	18	3	-70,736374	-35,321571	273,8