



Programa Regional de Entrenamiento

Geotérmico (PREG)

Diplomado de Especialización en Geotermia-2014

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Unidad de Postgrados



Técnicas para la elaboración de un modelo geológico en la exploración geotérmica, casos de aplicación en Argentina, Perú y Ecuador

Presentado Por:

Integrantes del grupo

Danilo ASIMBAYA (Geólogo)
Antonella GALETTO (Geóloga)
Diana PAJUELO (Geóloga)

Director del trabajo:

Arturo Quezada

Ciudad Universitaria, 31 de Octubre de 2014

ÍNDICE

Índice.....	1
1. Resumen.....	4
2. Introducción	4
3. Planteamiento del problema.....	5
4. Justificación	5
5. Objetivos.....	6
Generales	6
Específicos.....	6
6. Marco Teórico.....	7
6.1. Principales guías y metodologías en la exploración geotérmica	7
6.2. Imágenes satelitales en la exploración geológica	17
6.3. Geología en la exploración geotérmica	22
6.3.1. Fuente de Calor.....	22
6.3.2. Roca Reservorio.....	22
6.3.3. Capa Sello.....	22
6.3.4. Basamento	22
6.3.5. Evidencias hidrotermales (depósitos hidrotermales, zonas de alteración hidrotermales gases-aguas)	22
6.3.6 Zonas de ascenso upflow.....	23
7. Metodología	23
7.1. Identificación de la zona de interés.....	23
7.2. Recopilación de información.....	23
7.2.1. Estudios previos	24
7.2.1.1. Regional.....	24
7.2.1.2. Local	24
7.2.2. Mapas geológicos.....	25
7.3. Delimitación del área de estudio.....	25
7.4. Aspecto social y ambiental	25
7.5. Análisis de teledetección	26
7.5.1. Análisis geológico-estructural	27
7.5.2. Procesamiento de imágenes satelitales.....	28

7.5.2.1.	Delimitación de alteración hidrotermal	29
7.5.2.2.	Delimitación de anomalías térmicas	30
7.6.	Análisis de estudios complementarios	31
7.7.	Integración de datos	32
7.8.	Modelo geológico conceptual	32
8.	Análisis de datos y presentación de resultados	33
8.1.	Argentina	33
8.1.1.	Ubicación Geográfica y características generales	33
8.1.2.	Antecedentes	35
8.1.3.	Marco Geológico Regional	36
8.1.4.	Marco Geológico Local	39
8.1.5.	Análisis de teledetección	42
8.1.5.1.	Análisis geológico-estructural.....	42
8.1.5.2.	Delimitación de alteración hidrotermal	43
8.1.5.3.	Delimitación de anomalías térmicas.....	43
8.1.6.	Integración de datos	44
8.1.7.	Modelo geológico conceptual	45
8.2.	Perú.....	46
8.2.1.	Ubicación Geográfica y características generales	46
8.2.2.	Antecedentes	47
8.2.3.	Marco Geológico Regional	48
8.2.4.	Marco Geológico Local	49
8.2.5.	Análisis de teledetección	52
8.2.5.1.	Análisis geológico-estructural.....	52
8.2.5.2.	Delimitación de alteración hidrotermal	53
8.2.5.3.	Delimitación de anomalías térmicas.....	53
8.2.6.	Integración de datos	54
8.2.7.	Modelo geológico conceptual	55
8.3.	Ecuador	55
8.3.1.	Ubicación Geográfica y características generales	55
8.3.2.	Antecedentes	56
8.3.3.	Marco Geológico Regional	57

8.3.4.	Marco Geológico Local	62
8.3.5.	Análisis de teledetección	63
8.3.5.1.	Análisis geológico-estructural.....	63
8.3.5.2	Delimitación de alteración hidrotermal	65
8.3.5.3	Delimitación de anomalías térmicas.....	65
8.3.6.	Integración de datos	65
8.3.7.	Modelo geológico conceptual	67
9.	Conclusiones y Recomendaciones.....	68
10.	Agradecimientos	69
11.	Referencias Bibliográficas.....	70
12.	Apéndices.....	74

1. RESUMEN

Se han desarrollado y aplicado las metodologías consecuentes para la etapa de exploración de un proyecto geotérmico, siguiendo las bases planteadas por la “Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) ya la “Asociación Geotérmica Internacional (IGA)”, haciendo especial hincapié en las actividades asociadas a la etapa de trabajo de gabinete, previo a las investigaciones de campo, y orientadas al estudio de la geología. Estas metodologías se han enriquecido con el trabajo de procesamiento de imágenes satelitales a fin de identificar rasgos estructurales, alteraciones hidrotermales y anomalías térmicas. Estas metodologías fueron aplicadas en tres casos de estudio: en el campo geotérmico del cerro Domuyo, provincia de Neuquén, Argentina; en Ancocollo, provincia de Candarave-Tacna, Perú, y en Cotacachi, provincia de Imbabura, Ecuador. Debido a que en los tres casos las condiciones geológicas y fisiográficas son bien contrastadas, el procesamiento de las imágenes permitió obtener resultados distintos, siendo mejor aplicable las técnicas de procesamiento de imágenes en algunos casos que en otros. Finalmente los resultados abordados por el procesamiento de imágenes junto con el análisis de la información recopilada, permitió abordar en un modelo geológico conceptual en cada caso.

2. INTRODUCCIÓN

La ubicación en una zona geodinámica favorable para la existencia de sistemas geotérmicos, junto con estudios previos realizados en Argentina, Perú y Ecuador, dan a conocer el gran recurso geotérmico que puede ser aprovechado.

En los últimos años, con el incentivo de incrementar la actuación de las energías renovables y disminuir el consumo de combustibles fósiles; Argentina, Perú y Ecuador han retomado la iniciativa de investigar el recurso geotérmico para su aprovechamiento y explotación.

Los estudios de investigación realizados en las áreas geocientíficas, en la mayoría de casos, no han sido enfocados a la búsqueda de recursos geotérmicos; por lo que integrar estos datos con base en una buena recopilación y análisis de información, permitirán enriquecer el modelo Geológico con fines de exploración geotérmica. El avance tecnológico y las nuevas técnicas implementadas en investigaciones geológicas, han permitido desarrollar y mejorar los análisis, para llevar adelante un estudio con base en información más actualizada.

Por lo antedicho, el presente trabajo, pretende dar una nueva visión en la exploración de prospectos geotérmicos previamente identificados y poder ubicar sitios de interés. Para ello se busca implementar técnicas para la elaboración de un modelo geológico en base al análisis de imágenes satelitales y la integración de investigaciones geológicas, complementadas con datos geoquímicos y/o geofísicos recopilados; con el fin de tomar esta experiencia y aplicarlo en cada uno de los países considerados.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Conscientes del potencial geotérmico que posee América Latina y el Caribe, los trabajos para la elaboración de metodologías para el desarrollo y aprovechamiento del recurso geotérmico fue promovido por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). La “Guía para estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmicos” publicado en 1994, indica claramente los objetivos de la exploración geológica en geotermia y menciona los estudios de gabinete que se deben realizar previo a las campañas de campo. Sin embargo no detalla el procesamiento de las técnicas implementadas, como por ejemplo el de imágenes satelitales.

Trabajos más actuales se han desarrollado con el mismo objetivo, tal como el documento titulado “Geothermal exploration best practices: A guide to resource data collection, analysis, and presentation for geothermal projects” elaborada por International Geothermal Association (IGA) en colaboración de GeothermEx Inc., USA, y el Dr. Colin Harvey de Harvey Consultants Ltd, de Nueva Zelanda y publicado en 2013. Las dos metodologías mencionan los criterios para la elección de información, pero esta última detalla más las directrices para el proceso de desarrollo de un proyecto geotérmico y ejemplifica en casos puntuales, sin profundizar en los procedimientos de las técnicas.

Así como las metodologías mencionadas, existe una innumerable fuente de información que describen el aprovechamiento y las etapas de investigación para su desarrollo en la exploración geotérmica; sin embargo al ser publicaciones que abarcan una gran cantidad de información no hacen énfasis en los procedimientos de las técnicas de exploración geológica y del cómo se deben analizar, previa la etapa de campo.

Considerando que la fase de reconocimiento en un proyecto geotérmico se divide en dos etapas principales: estudios de gabinete y trabajo de campo; de estos el trabajo de campo al ser el más importante y vital en los estudios de exploración geológica, y en general en los geo-científicos, detallan más este apartado con el afán de dar a conocer la técnicas de campo y los objetivos de la exploración geológica, para la elaboración de un modelo.

Por consiguiente, previa la etapa de campo y con base en metodologías establecidas en la exploración geotérmica ¿Cuáles son las técnicas y procedimientos a implementarse en la elaboración de un modelo geológico para Argentina, Perú y Ecuador?

4. JUSTIFICACIÓN

La información preliminar constituye el primer elemento clave que apoya el desarrollo de un proyecto o programa geotérmico; de un buen análisis de información geológica recopilada, dependerá el éxito de una campaña de exploración, ya que se consigue una visión general de la zona y se pueden reducir los trabajos geológicos de campo a

la realización de comprobaciones y análisis de zonas dudosas mediante la aplicación de técnicas complementarias como geoquímica y/o geofísica.

Por lo expuesto, ante la carencia de información en guías y metodologías de exploración geotérmica que detallen los procedimientos a seguir en el análisis de un prospecto geotérmico “previa la etapa de campo”; el presente trabajo pretende ser un aporte teórico para el uso de herramientas en estudios geológicos, haciendo un especial énfasis en instrumentos de libre acceso y técnicas desarrollables en oficina, como son las técnicas de teledetección.

Además, se detallan los pasos a seguir previo una campaña de exploración y se ejemplifica en tres casos de aplicación. De esta forma, el interesado hará uso de este documento con el objetivo principal de obtener un esquema geotérmico preliminar de la zona de estudio para consecuentemente desarrollar un programa de exploración en cada prospecto geotérmico de interés. Este documento principalmente será útil para prospectos geotérmicos donde las investigaciones aún se encuentran en etapas iniciales, así mismo, la secuencia puede variar de acuerdo a las condiciones y características locales.

5. OBJETIVOS

Generales

- Desarrollar técnicas para la elaboración de modelos geológicos conceptuales aplicando un caso de estudio para cada país: Argentina, Perú y Ecuador.
- Realizar una caracterización geológica preliminar de cada uno de los casos de aplicación.

Específicos

- Integrar y correlacionar datos litológicos, estructurales y de evidencias hidrotermales de cada caso de estudio.
- Confeccionar mapas temáticos y perfiles geológicos.
- Confeccionar cartas de anomalías térmicas para identificar puntos de interés geotérmico de manera estimada en cada caso.
- Desarrollar el modelo geológico conceptual para cada caso de aplicación.
- Complementar el modelo geológico conceptual con datos de exploración geoquímica y/o geofísica para los casos que dispongan de ellos.
- Determinar puntos de interés geotérmico para cada caso de estudio.
- Proponer trabajos de investigación convenientes a realizarse en futuras etapas de estudio.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. PRINCIPALES GUÍAS Y METODOLOGÍAS EN LA EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

Este segmento presenta una reseña de las principales guías y metodologías para el desarrollo de proyectos geotérmicos. Existe una innumerable cantidad de ejemplares de distintas organizaciones que persiguen contribuir al desarrollo energético geotérmico (Tabla 1). Nos dedicaremos a abordar los aspectos metodológicos planteados por OLADE e IGA, las cuales además de ser claras y completas, contienen aspectos técnicos precisos muy útiles. En ellas, se hará especial hincapié en las actividades asociadas fundamentalmente a la etapa de trabajo de gabinete, previo al primer trabajo de campaña, y orientadas al estudio de la geología; con el objetivo de destacar la importancia que merece como ciencia en la etapa de reconocimiento de un proyecto geotérmico.

Organización	Guía y Aplicación
OLADE “Organización Latinoamericana de Energía”	Seis guías y metodologías de exploración y explotación geotérmica, adaptables a las condiciones y características de los países de la región de Latinoamérica y el Caribe.
IGA “Asociación Geotérmica Internacional”	Guía práctica para la exploración geotérmica denominada “Geothermal Exploration Best Practices: A guide to resource data collection, analysis and presentation for geothermal projects”.
Comunidad de Madrid	“Guía de la Energía Geotérmica” que enfatiza los métodos de investigación de baja, media y alta entalpía, y métodos de usos directos del calor geotérmico.
ESMAP “Energy Sector Management Assistance Program”	“Manual de Geotermia: Como planificar y financiar la generación de electricidad”. Indica cómo estructurar, diseñar e implementar un programa de desarrollo geotérmico
NACIONES UNIDAS. Comisión Económica para América Latina y el Caribe	“Financiamiento y regulación de las fuentes de energía nuevas y renovables: el caso de la geotermia”. Proporciona un panorama global sobre problemáticas de desarrollo de energía geotérmica e identificando posibles soluciones para el futuro.
U.S. Department of Energy. GEOTHERMAL TECHNOLOGIES PROGRAM	“Exploration 1976 – 2006. A History of Geothermal Energy Research and Development in the United States”

Tabla 1. Principales metodologías para el desarrollo de proyectos geotérmicos.

Metodologías según “Olade”

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) es una organización política y de apoyo técnico, que persigue contribuir al desarrollo energético de Latinoamérica y el Caribe. A lo largo del tiempo ha desarrollado e integrado metodologías de exploración y explotación geotérmica, adaptables a las condiciones y características de los países de la región, a fin de orientar la investigación de recursos geotérmicos, y contribuir con guías y metodologías de estudio y reconocimiento de sus territorios. Esto permitiría a

cada país poder determinar si sus zonas termales identificadas poseen condiciones favorables para llegar a constituir un campo geotérmico, y de ser así, brindar los pasos a seguir para permitir el abordaje de un proyecto geotérmico en todas sus etapas.

Sus trabajos para la elaboración de las metodologías fueron promovidos a finales de la década de los '70 e inicios de los '80. La propuesta inicial constó de 3 publicaciones principales, denominadas:

- “Metodología de Exploración Geotérmica para las fases de Reconocimiento y Prefactibilidad” (1978)
- “Metodología de la Exploración y Explotación Geotérmica para la fase de factibilidad” (1979)
- “Metodología de Exploración y Explotación Geotérmica para las Fases de Desarrollo y Explotación” (1980), posteriormente revisada dando lugar a la “Metodología de la Explotación Geotérmica” (1986).

Ante la necesidad de actualizar las metodologías debido al rápido desarrollo tecnológico de la geotermia, las mismas fueron revisadas y actualizadas en la década de los '90 con el apoyo del Banco Internacional de Desarrollo (BID), para dar lugar a seis nuevas metodologías para la exploración y explotación geotérmica.

En este trabajo se profundizará sobre una de las seis guías, orientada a los estudios de reconocimiento de un proyecto geotérmico, denominada “*Guía para estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmicos*”. Esta guía indica claramente los objetivos de la exploración geológica y menciona los estudios de gabinete que se deben realizar previo a las campañas de campo. Dentro de esta guía, se profundizará sobre las dos primeras fases que integran la etapa de reconocimiento, y se describirán los estudios específicos asociados, relacionados a la Geología, poniendo especial interés en sus trabajos de gabinete y programación de investigaciones de campo.

Guía para Estudios de Reconocimiento Geotérmicos (OLADE)

OLADE, desde un punto de vista práctico, divide a un proyecto geotérmico en cinco etapas, de las cuales las tres primeras se refieren a la parte propiamente exploratoria del proyecto; y las otras dos a la producción sistemática del fluido, a su utilización industrial y a resolver los problemas de gestión de campo. Dichas etapas se puede apreciar en la Tabla 2. La escala de trabajo puede variar en base a la extensión territorial de cada país.

Los “Estudios de Reconocimiento” están asociados a la primera etapa en la ejecución de un proyecto geotérmico. En la Tabla 3 se describen las características principales de esta etapa, y se resaltan las fases de interés que la componen, y que interesan al objetivo de este trabajo.

Etapas en la ejecución de un proyecto geotérmico s/OLADE		
ETAPA I	Estudio de reconocimiento Área $\geq 1.000 \text{ km}^2$	EXPLORACIÓN
ETAPA II	Estudio de prefactibilidad Área $\geq 400 - 500 \text{ km}^2$	
ETAPA III	Estudio de factibilidad Área $\geq 10 - 100 \text{ km}^2$	
ETAPA IV	Desarrollo	EXPLOTACIÓN
ETAPA V	Explotación	

Tabla 2. Etapas en la ejecución de un proyecto geotérmico

Estudios de RECONOCIMIENTO según OLADE		
¿En qué consisten?	En la evaluación preliminar de los recursos geotérmicos susceptibles de ser aprovechados con fines de generación eléctrica o en otros usos en una región determinada, identificando y delimitando las áreas de mayor interés, para plantear, de manera concreta, las líneas de acción a seguir en la siguiente etapa de la investigación (prefactibilidad).	
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> -Evaluar en forma preliminar las posibilidades geotérmicas a nivel nacional o regional. -Identificar las áreas de interés geotérmico. -Definir un sistema geotérmico preliminar. -Definir un sistema geotérmico preliminar de cada área identificada y seleccionar las más atractivas para la ejecución de estudios de prefactibilidad. -Elaborar un programa de exploración detallada (de prefactibilidad) para las áreas de interés geotérmico. 	
FASES	Fase I	Recopilación de información disponible
	Fase II	Evaluación de la información, trabajos de gabinete, preparación y ejecución de un programa de investigaciones geocientíficas de campo y laboratorio.
	Fase III	Interpretación integrada de los estudios, definición del área o áreas de interés geotérmico y estimación de potencial energético
	Fase IV	Preparación de un programa de estudios de prefactibilidad.

Tabla 3. Estudios de reconocimiento según OLADE

Fases del estudio de reconocimiento según OLADE:

Dentro de la etapa de reconocimiento, OLADE considera la existencia de cuatro fases como se indica en la Tabla 3. Como se dijo anteriormente, en este segmento sólo nos centraremos en la metodología planteada para la evaluación de la información recopilada (**FASE I**), en los trabajos de gabinete, planeamiento y programación de las futuras investigaciones de campo (**FASE II**). Ambas fases se describen en la Tabla 4.

FASE	Objetivos
FASE I	<p>Recopilación de documentación básica del proyecto relacionada a:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Información bibliográfica de estudios de carácter regional y detalle. - Mapas geológicos y topográficos regionales a cualquier escala, pero preferentemente los de escalas entre 1: 100.000 y 1: 1.000.000. - Información específica asociada a manifestaciones termales y fumarolas de la zona. - Imágenes de satélite ya sea en el rango visible o el infrarrojo (Landsat Multiple Spectral Sensor (MSS), Thematic Mapper™, Spot y HCMM), imágenes de radar y fotografías aéreas de escala regional. En los casos en los que sea posible, será conveniente disponer de información digitalizada para procesarla posteriormente. - Datos del subsuelo (columnas, registros geofísicos, etc.) recabados en pozos perforados para otros fines, en el caso de disponer. - Datos de métodos geofísicos previos, de existir. - Datos sobre la hidrología, la hidrogeología y la meteorología. - Integración y procesamiento de datos recopilados mediante el uso de sistemas informáticos de manejo de datos del tipo denominado sistema de información geográfica (GIS).
FASE II	<p>Evaluación de la información recopilada en la Fase I. Identificar las zonas geotérmicas conocidas y potenciales Definir el área o las áreas donde se llevarán a cabo investigaciones geocientíficas de campo, a partir de la interpretación de imágenes de satélite y el procesado de la información realizado en la Fase I.</p>

Tabla 4. Descripción de Fase I y Fase II de la etapa de reconocimiento según OLADE.

Como resultado de esta evaluación, posteriormente se programarán investigaciones de campo con estudios específicos de geología, hidrogeología y geoquímica, cuyos objetivos serán obtener información relacionada con la existencia de condiciones favorables para la presencia de uno o más yacimientos geotérmicos. Luego de realizadas las investigaciones de campo, sus levantamientos se complementarán con trabajos de laboratorio tanto petrográficos como químicos, isotópicos y de dataciones de rocas.

Luego de concluida esta fase, y de realizadas las investigaciones de campo y laboratorio, se llevan a cabo la **FASE III y FASE IV**.

Estudios específicos: “La GEOLOGÍA en la etapa de reconocimiento”

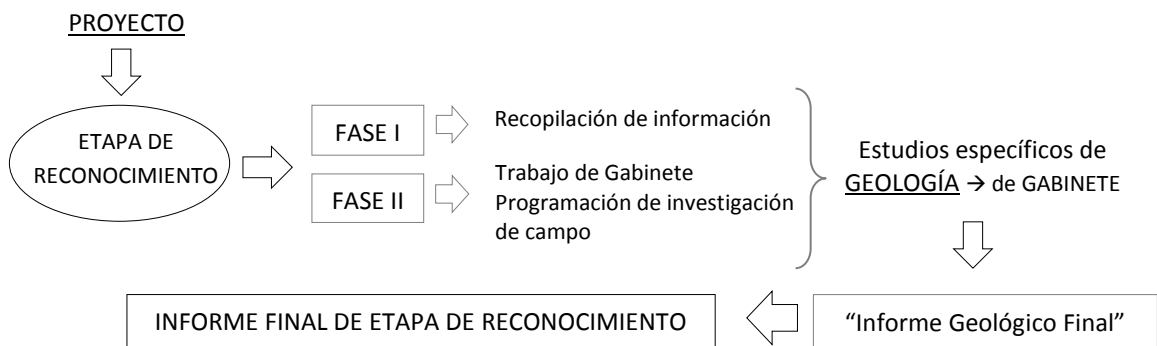


Fig. 1: Esquema de secuencia de investigación adoptado

Según OLADE, en la programación de estudios necesarios para la etapa de prefactibilidad, se deberán detallar los trabajos que se tendrán que realizar en lo que respecta a la geología, geoquímica, geofísica, hidrogeología, estudios ambientales y perforaciones exploratorias de diámetro pequeño. Dentro de las Fases I y II de la etapa de reconocimiento que ya hemos descrito, se ubican los estudios específicos de geología a realizar (Fig. 1).

OLADE considera que la contribución de la GEOLOGÍA en la etapa de reconocimiento es fundamental, y determina que sus alcances serán:

- Proporcionar elementos geocientíficos que permitan identificar y clasificar, en orden prioritario, las áreas de interés geotérmico.
- Elaborar la cartografía regional y definir el esquema geovulcanológico preliminar de la zona investigada
- Definir la relación geodinámica regional con la tectónica y el vulcanismo de la zona
- Determinar las anomalías termales someros de la corteza terrestre
- Definir la secuencia estratigráfica regional y las características litológicas de las formaciones que la integran

En lo que respecta a la secuencia de trabajo a seguir para los estudios específicos de Geología, OLADE plantea:

- Trabajos de gabinete
- Trabajos de campo
- Trabajos de laboratorio

Con base a la información recopilada en la primera fase de la etapa de reconocimiento, se procede a realizar la siguiente secuencia de actividades (Tabla 5):

Trabajos de GABINETE para la etapa de reconocimiento según OLADE	
1. Evaluación y síntesis de la información existente	Determinar el grado de conocimiento de la geología que se tenga sobre la o las regiones por explorar. Orientar adecuadamente las investigaciones complementarias.
2. Estudios de teledetección y morfoestructurales:	<u>Se trabajará con:</u> -Cartas topográficas de gran escala (1:50.000, 1:100.000 o 1:200.000) -Fotografías aéreas (1:60.000 o 1:50.000) -Imágenes de satélite (1:1.000.000 o 1:500.000) -Imágenes radar, útiles para áreas cubiertas con intensa vegetación o para la individualización de superficies sepultadas.
	<u>Finalidad: Recabar información sobre:</u> .Litología: Inferida por el análisis de fotografías aéreas. .Zonas de alteración hidrotermal: Reconocibles mediante el análisis y procesado de imágenes Landsat TM. .Relación entre el régimen tectónico y centros vulcanológicos de la región.

	<p><u>Objetivo:</u> .Elaboración de cartas estructurales: Identificación de lineamientos con el objetivo de realizar una carta estructural, para Inferir el régimen tectónico predominante a partir del tipo de fallas identificadas y estructuras tectónicas. -Elaboración de mapas geovulcanológicos y tectónicos, para establecer la evolución estructural de los aparatos volcánicos y su relación con los productos identificados de sus erupciones recientes.</p>
3. Plano geológico estructural preliminar	Se integra la información en una carta geológica y estructural preliminar de la región de estudio, de escalas 1:100.000 o 1:250.000 (1:50.000 para casos de áreas pequeñas $\leq 1.000 \text{ km}^2$); complementada con un esquema de la secuencia estratigráfica. Esta carta geológica servirá para la siguiente etapa de investigaciones de campo.
4. Planificación de investigaciones de campo y trabajos de laboratorio:	<p>-Se subdivide la carta geológico estructural elaborada, en grandes unidades homogéneas desde el punto de vista volcánico, estratigráfico y tectónico. Para cada una de ellas se reconstruirá la secuencia estratigráfica de la región y se elaborará una descripción cronológica de los procesos tectónicos principales. Para tal propósito se usará y el plano elaborado en la fase de gabinete.</p> <p>-Se planificarán todas y cada una de las actividades a realizar en campo, teniendo en cuenta la extensión del área sujeta a investigación, la cantidad de información geocientífica previamente disponible, la infraestructura vial del área, la infraestructura técnica disponible, facilidades de alojamiento, y el clima de la región.</p>

Tabla 5. Trabajos de gabinete para la etapa de reconocimiento según OLADE.

Informe geológico final: “Síntesis de los datos recopilados y evaluados”

Finalmente se deberá presentar un informe de **“Síntesis de los datos recopilados y evaluados”**, correspondiente a la Etapa de Reconocimiento. Dicho informe deberá ser preparado por el personal especializado responsable de la ejecución de esta etapa, y contendrá los aspectos referentes a la programación y planificación de trabajos de campo y laboratorio que deberán hacerse, el cual deberá ser congruente con el grado de conocimiento de la geología de la región en estudio.

Este informe, junto con los informes de “Avances del programa”, el “Informe Geovulcanológico Preliminar” determinado a partir de las investigaciones de campo, y el “Informe de Laboratorio”, permitirá abordar el INFORME GEOLÓGICO FINAL. El mismo integra la información procesada en gabinete, la obtenida en campo y en laboratorio.

Finalmente se aborda una INTEGRACIÓN GEOCIÉNTIFICA de los estudios geológicos de gabinete, campo y laboratorio, junto con los estudios específicos abordados por las especialidades de geoquímica, geofísica, hidrogeología y estudios

ambientales con sus respectivos informes, para concluir en un “Informe Final de la Etapa de Reconocimiento”.

Metodologías según “IGA”

La Asociación geotérmica Internacional (IGA), fundada en 1988, es una organización científica, educativa y cultural establecida para operar en todo el mundo. Es una organización no gubernamental, sin fines de lucro, cuyos objetivos son fomentar la investigación, el desarrollo y utilización de los recursos geotérmicos en todo el mundo a través de la publicación de información científica y técnica.

En marzo del 2013, la IGA publica una guía práctica para la exploración geotérmica denominada “*Geothermal Exploration Best Practices: A guide to resource data collection, analysis, and presentation for geothermal projects*”. A continuación se describen su contenido relevante para la etapa de reconocimiento preliminar de un proyecto, y los estudios específicos de Geología asociados.

Fases de desarrollo de un proyecto geotérmico según IGA

Esta guía sigue un proceso de siete fases de desarrollo de proyectos geotérmicos, basada en la línea de trabajo planteada por el manual de Planeamiento y Financiación de Proyectos Geotérmicos del Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), 2012. Se hará especial hincapié en la **Fase I y Fase II**, relacionadas con las primeras etapas de un proyecto geotérmico, y en los estudios específicos de geología asociados (Tabla 6).

Fases de un proyecto geotérmico s/IGA	
FASE I	Estudios preliminares
FASE II	Exploración
FASE III	Pruebas de perforación
FASE IV	Revisión y planificación de proyecto
FASE V	Desarrollo de campo
FASE VI	Construcción de planta geotérmica
FASE VII	Puesta en marcha y operación

Tabla 6. Fases de un proyecto geotérmico según IGA.

FASE I: Estudios preliminares

A. DATOS TÉCNICOS: Búsqueda bibliográfica

Se realiza una búsqueda de bibliografía disponible acerca de manifestaciones geotérmicas activas de la zona, la geología, geoquímica y geofísica, y datos de temperatura subsuperficial de pozos preexistentes. Algunas de las tareas que deben ser consideradas en este paso según IGA son:

- Búsqueda y evaluación de cualquier dato perteneciente de la zona de estudio.
- Búsqueda de datos de la geología, hidrología, geoquímica y geofísica de la zona.
- Revisión bibliográfica exhaustiva por especialistas experimentados en geotermia

- Búsqueda de datos históricos
- Revisión de literatura: on-line e incluir visitas a agencias gubernamentales locales, universidades y otras instituciones.
- Recolección de mapas topográficos, mapas de accesos permitidos, de restricciones al uso de la tierra, entre otros.
- Creación de una biblioteca de conjuntos de datos, informes y documentos relevantes y bibliografía. Copias de los documentos más importantes (los que tienen relación directa con la zona investigada).
- Preparación de un documento resumen de esfuerzos de exploración previos.
- Ejemplos de fuentes de datos a ser investigadas: Publicaciones académicas de universidades locales y extranjera; datos, resultados o informes de campañas de exploración previas; informes y documentos de los organismos pertinentes del gobierno nacional, provincial y municipal; mapas relacionados con la geología, la infraestructura y los límites del contrato de arrendamiento.

B. DATOS NO TECNICOS: Aspectos legales y ambientales

Aspectos legales: necesarios a ser considerados para poder identificar las posibles barreras que afecten sus tiempos de desarrollo del proyecto. Se incluye la obtención de licencia nacional o provincial para actividades de exploración en la zona, junto con los mapas que muestren la localización detallada de la zona; y la investigación acerca de restricciones de acceso a la zona, al uso de la tierra y restricciones ambientales, respaldada por documentos y mapas que lo determinen. También se debe tener en cuenta las características del mercado energético nacional, y el marco institucional y regulatorio del uso del recurso.

Aspectos ambientales y sociales: Consiste en una evaluación de las principales cuestiones ambientales o factores que podrían afectar o ser afectados por un proyecto geotérmico.

FASE II: Exploración

Secuencia de trabajo sugerida por IGA para la fase de exploración:

1. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN A ESCALA REGIONAL:

Los trabajos realizados en esta fase incluyen la recopilación de datos geológicos y análisis, recopilación de datos geoquímicos y análisis y estudios geofísicos.

2. BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN A ESCALA LOCAL

Si los datos recogidos a escala regional son alentadores, el proyecto pasa a una etapa de exploración localizada, durante el cual la exploración se enfoca en las áreas de recursos más favorables. En esta fase se realiza una estimación preliminar de la magnitud de los recursos, y se elabora un modelo conceptual preliminar que luego se actualizará con los datos obtenidos en las siguientes fases. Según IGA, la búsqueda de información a escala local, seguirá la siguiente secuencia de investigación:

- A) Análisis de manifestaciones geotérmicas activas
- B) Análisis geológico
- C) Análisis geoquímicos
- D) Análisis geofísico

Cada etapa de análisis, contendrá una recopilación y análisis de los datos de cada especialidad previamente disponibles, y recolectados durante investigaciones de campo, y finalmente un modelo preliminar de cada especialidad.

El paso siguiente consiste en elaborar el MODELO CONCEPTUAL PRELIMINAR, como resultado de la integración de los modelos geológicos, geoquímicos y geofísicos preliminares. Una vez que el modelo conceptual se ha construido, se puede elaborar un MODELO NUMÉRICO DE PREDICCIÓN del rendimiento en el futuro del yacimiento. En él se ingresan datos de producción para comprobar la validez del modelo conceptual, y poder estimar el impacto que explotación geotérmica generará en el recurso, y por lo tanto predecir la posible degradación del yacimiento y el potencial de producción. La ETAPA FINAL de la fase de exploración es la evaluación de todos los datos disponibles para decidir si se abordarán las perforaciones de prueba de la siguiente fase.

Análisis geológico en la etapa de exploración:

Al igual que OLADE, IGA considera fundamental el conocimiento de la geología del área del proyecto, de su entorno geológico regional del área y su marco tectónico estructural para entender un sistema geotermal. Durante la revisión de la literatura, el desarrollador evalúa el estado de la cartografía geológica de la zona en cuestión. Una vez que los mapas existentes han sido ubicados y examinados, se deben emprender los siguientes pasos para evaluar y complementar la información existente.

Se debe evaluar la exactitud e idoneidad de los mapas existentes y secciones transversales comparándolos con observaciones de campo. Si la calidad de la cartografía existente es suficiente, pero las secciones transversales no se han construido para el área del proyecto, esto se debe hacer. Si la calidad de la cartografía existente y / o secciones transversales es insuficiente, nueva cartografía geológica debe llevarse a cabo. En cualquier caso, múltiples secciones transversales deben ser construidos a través de la zona del proyecto para presentar y evaluar la estructura del subsuelo tres dimensiones. Finalmente, esta información debería indicar qué unidades o estructuras podrían ser anfitrión de una de las fuentes de energía geotérmica, y forma la base para la posterior los modelos conceptuales y numéricos.

En resumen, las actividades pertinentes al análisis geológico sugeridas por IGA son:

- Elaboración de mapas geológicos del área bajo licencia. Para esta actividad se sugiere el trabajo con Imágenes Landsat y ASTER y se recomienda utilizar el Sistema de Información Geográfica (SIG) para el análisis de base de datos.
- Trabajo de teledetección: Se pueden aplicar estudios sobre satélite o escáneres infrarrojos, y datos térmicos adquiridos por Thematic Mapper (TM) y Enhanced

Thematic Mapper Plus (ETM) y los satélites Landsat-5 y Landsat-7. También se pueden utilizar datos espaciales de emisión térmica avanzada y radiómetro de reflexión (ASTER). Puede ser apropiado desarrollar una base de datos de sistema de información geográfica (SIG) de sitios con potencial geotérmico basados en fotos aéreas y datos de satélite. Sin embargo, la confirmación de anomalías termales siempre requiere verificación sobre el terreno.

- Elaboración de secciones transversales del área bajo licencia.
- Resumen y descripción de la litología y estratigrafía de la zona mediante la presentación de columnas estratigráficas detalladas.
- Resumen y descripción de el régimen estructural regional y local, acompañado de mapas geológico-estructurales.
- Identificación y caracterización del potencial energético del reservorio.
- Identificación de zonas de alteración hidrotermal.
- Reporte geológico final.
- Presentación de modelo geológico preliminar (con datos de litología, profundidad de reservorio, porosidad y permeabilidad asociada).

Cuadro resumen comparativo de metodologías de OLADE e IGA relacionados a la fase de investigación pre-campo (Tabla 7).

	OLADE		IGA
Etapas asociadas a investigación previas a primer trabajo de campaña	ETAPA I	Fase I: Recopilación de información disponible	FASE I: Estudios preliminares
		Fase II: Evaluación de la información, trabajos de gabinete, preparación de un programa de investigaciones de campo y laboratorio.	FASE II: Exploración Actividades de exploración previas a campo.
Actividades previas a primer trabajo de campaña	Recopilación de documentación básica del proyecto. Evaluación de la información recopilada en la Fase I. Identificación de zonas geotérmicas conocidas y potenciales Definición de área o áreas de interés.		FASE I: Estudios preliminares: Datos técnicos: búsqueda bibliográfica Datos no técnicos: aspectos legales y ambientales FASE II: Exploración: Búsqueda de información a escala regional Búsqueda de información a escala local: a. análisis de manifestaciones geotérmicas activas b. análisis geológico c. análisis geoquímico d. análisis geofísico
Estudios específicos de GEOLOGÍA	1. Evaluación y síntesis de la información existente 2. Estudios de teledetección y morfoestructurales: 3. Plano geológico estructural preliminar 4. Planificación de investigaciones de campo y trabajos de laboratorio 5. Informe geológico final: "Síntesis de los datos recopilados y evaluados" 6. Informe final de la Etapa de Reconocimiento y Resultados:		Elaboración de mapas geológicos. Trabajo de teledetección. Elaboración de secciones transversales. Resumen y descripción de la litología y estratigrafía de la zona. Resumen y descripción del régimen estructural regional y local, acompañado de mapas geológico-estructurales. Identificación y caracterización del potencial energético del reservorio. Identificación de zonas de alteración

		hidrotermal. Reporte geológico final. Modelo geológico preliminar
Estudios de teledetección	<u>Trabajo con:</u> Cartas topográficas de gran escala. Fotografías aéreas Imágenes de satélite Imágenes radar <u>Objetivo final:</u> Identificar zonas de alteración hidrotermal mediante el análisis y procesado de imágenes Landsat TM. Elaboración de cartas estructurales. Elaboración de mapas geovolcanológicos y tectónicos.	<u>Trabajo con:</u> Imágenes de satélite o escáneres infrarrojos, Datos térmicos adquiridos por Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM) y los satélites Landsat-5 y Landsat-7. Datos espaciales de emisión térmica avanzada y radiómetro de reflexión (ASTER). <u>Objetivo Final:</u> Desarrollar una base de datos de sistema de información geográfica (SIG) de sitios con potencial geotérmico basados en fotos aéreas y datos de satélite.

Tabla 7. Cuadro comparativo de metodología de OLADE e IGA.

6.2. IMÁGENES SATELITALES EN LA EXPLORACIÓN GEOLÓGICA

Resulta conveniente desarrollar y usar la tecnología para obtener mejores resultados en la etapa de exploración. A partir de la puesta en órbita de los satélites artificiales y por medio de los sensores remotos se han ido valorando la importancia del uso de imágenes satelitales en los campos de la geología. Esta herramienta no sólo es conveniente sino precisa y económica (Ke-sheng and Ming-yuan, 2010). Los sensores remotos han jugado un papel importante en los estudios geotermales debido que detectan superficies anómalas que pueden ser usados para encontrar campos geotermales potenciales (Siahaan et al., 2011; Yamaguchi Y et al., 1996). Adicionalmente, el desarrollo de nuevos sensores ha permitido mejorar las técnicas respecto a la identificación de estructuras como fallas activas y zonas de alteración hidrotermal. El uso de estas herramientas es importante para realizar el análisis del terreno antes de ir al campo y generar mapas que resalten la información geológica.

Principios básicos

La teledetección es la capacidad de obtener información de un objeto o fenómeno sin tener contacto con él, las imágenes satelitales son un ejemplo de esto y son productos que se obtienen a partir de un sensor instalado en un satélite artificial, los sensores pueden ser pasivos (ópticos) o activos.

Los sensores pasivos captan los elementos de la superficie terrestre y los activos se encuentran montados en satélites más recientes que captan los ecos reflejados por los distintos elementos del terreno y pueden operar de día o de noche bajo cualquier condición de visibilidad. Resulta más fácil trabajar con los sensores pasivos por la facilidad en la interpretación.

Los sensores son importantes porque captan la reflexión de una fuente de energía en la superficie de la Tierra, detectan determinadas bandas electromagnéticas y las retransmite adecuadamente, esta información genera imágenes satelitales.

Tipos de resolución

A. RESOLUCIÓN ESPACIAL

Aquí se reconoce el objeto más pequeño que se puede distinguir en una imagen y se le conoce como pixel. Los pixeles quedan agrupados en imágenes multispectrales formadas por varias bandas o planos, que representan la reflectancia del terreno en cada una de las correspondientes bandas del espectro electromagnético.

B. RESOLUCION ESPECTRAL

Es el número y ancho de bandas espectrales que puede discriminar el sensor.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Está dividido en regiones basadas en sus longitudes que son:

- **Espectro Visible** (0.4 μm a 0.7 μm): Radiación perceptible por nuestra vista. Dentro de esta se tiene 3 bandas que son: Azul (0,4 μm -0,5 μm), Verde (0,5 μm -0,6 μm) y Rojo (0,5 μm -0,6 μm) que son los colores primarios.
- **Infrarrojo cercano** (0,7 μm -1,3 μm): Puede detectarse a partir de filmes dotados de emulsiones especiales. Su importancia radica en que discrimina las masas vegetales.
- **Infrarrojo medio** (1,3 μm -8 μm): En esta se puede obtener el contenido de humedad en la vegetación. Percibe la humedad (nubes).
- **Infrarrojo lejano o térmico** (8 μm -14 μm): Comprende la porción emisiva del espectro donde se detecta el calor proveniente de la cubierta terrestre.
- **Micro ondas**: Son aquellas que penetran por nubes, neblina, lluvia, imágenes se obtiene por scanning systems activos y pasivos.

Entre las bandas más utilizadas están el azul, verde y rojo que conforman la luz visible, el infrarrojo cercano, el infrarrojo medio, el infrarrojo lejano o térmico (Fig. 2), donde operan los sensores remotos pasivos (Rodríguez Aycho, 2008) y las microondas donde operan sensores activos.

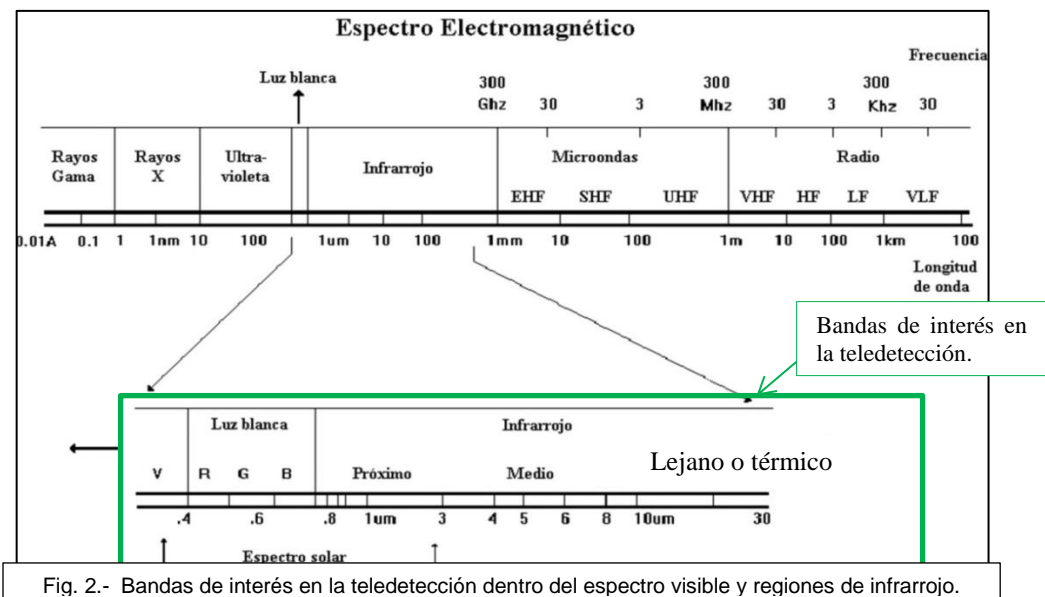


Fig. 2.- Bandas de interés en la teledetección dentro del espectro visible y regiones de infrarrojo.

C. RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA

Se refiere a la sensibilidad del sensor y se mide por la cantidad de niveles de color en que se divide la radiación recibida, para ser almacenada y procesada posteriormente.

D. RESOLUCIÓN TEMPORAL

Es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita.

Características de Imágenes Satelitales Aplicadas en exploración geológica

Las imágenes satelitales más utilizadas en la exploración geológica se detallan a continuación (Tabla 8), los campos sombreados, corresponden a imágenes gratuitas y de fácil acceso en la web y se detallan de la siguiente manera:

IMAGEN SATELITAL	CARACTERÍSTICA TÉCNICA	APLICACIÓN
Imágenes Landsat 5	7 bandas espectrales, 30m de resolución	Mapeo hidrotermal e identificación de minerales de alteración. Propiedades térmicas del suelo. Landsat 8 permite mejorar el mapeo termal.
Imágenes Landsat 7	8 bandas espectrales, 30m de resolución	
Imágenes Landsat 8	9 bandas espectrales, 2 bandas térmicas	
Spot	4 bandas espectrales a resolución 4m por píxel y banda pancromática 1m de píxel	Fotointerpretación. Interpretación geológico-estructural.
Ikonos	4 bandas multispectrales de 10m de resolución, 1 banda pancromática 2.4 o 5m de resolución.	Fotointerpretación
Aster	Presenta 3 subsistemas: Visible e infrarrojo cercano (VNIR) infrarrojo de onda corta (SWIR) e infrarrojo termal (TIR).	Permite diferenciar arcillas y minerales típicos de alteración. Sirve para detectar anomalías termales.
Modelo de Elevación Digital (DEM)	Se obtienen a partir de imágenes Aster, Radar aplicando interferometría, Lidar con tamaños de celda de 2m de precisión. También con pares estereoscópicos de fotografías aéreas.	Generar topografía hasta en una escala 1:50,000.
SRTM	Resolución de 90m para imágenes fuera de EEUU, actualmente se están ofreciendo imágenes de hasta 30m de resolución.	Generar base de mapa topográfico completa, digitales de alta resolución de la Tierra.
Radarsat	Colecta datos sin tener en cuenta condiciones atmosféricas de la Tierra. Usa frecuencia microondas. Abarca resoluciones de 10, 30 y 100m en diferentes áreas.	Información geológica - litológica. Interpretación geológico estructural, lineamientos y forma de terreno.
Insar	Es una clase de radar. Muestra los ligeros movimientos en la superficie de terreno.	Permite monitorear fallas activas, efectos en la superficie de la inyección y extracción de fluidos.
Google Earth	Obtiene recopilación de imágenes satelitales, obtenidas a partir de la compañía Digital Globe. Compatible con sistemas GIS actuales y antiguos. Vista 3D.	Se puede visualizar y realizar trazos convenientes sobre área de estudio.

Tabla 8.- Imágenes satelitales, características y aplicaciones en la exploración geológica. Resaltadas en verde imágenes que se abordan para el análisis en el presente trabajo.

A. Imágenes Landsat

Primer satélite enviado por los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. El último satélite Landsat 8 fue puesto en órbita el 11 de febrero del 2013, actualmente lleva más de un año en órbita.

Las imágenes Landsat se caracterizan por la variedad de bandas que las componen. Entre las más importantes se encuentran las imágenes Landsat 7 (sensor ETM+) y Landsat 5 (sensor TM); ambas poseen 7 y 8 bandas multispectrales que van desde el

visible hasta el infrarrojo medio, con una resolución de 30 metros, en la mayoría de ellas (Tabla 9).

Banda	Región Espectral			Ancho de banda (µm) Landsat 5, 7	Ancho de banda (µm) Landsat 8	Resolución (m)	Aplicaciones Landsat 5, 7	Aplicaciones Landsat 8
	TM	ETM	OLI, TIRS					
1		Azul	Neblina Costera	0.45 - 0.52	0.43 - 0.45	30	Mapeo de aguas costeras. Diferenciación entre suelo y vegetación.	Estudios de costa y neblina.
2		Verde	Azul	0.52 - 0.60	0.45 - 0.51	30	Mapeo de vegetación. Calidad de agua.	Mapeo de aguas costeras. Diferenciación entre suelo y vegetación.
3		Rojo	Verde	0.63 - 0.69	0.53 - 0.59	30	Áreas urbanas y uso del suelo. Agricultura. Calidad de agua.	Mapeo de vegetación. Calidad de agua.
4		Infrarrojo cercano	Rojo	0.76 (0.77) - 0.9	0.64 - 0.67	30	Mapeo geomorfológico y geológico. Agricultura y vegetación.	Áreas urbanas y uso del suelo. Agricultura. Calidad de agua.
5		Infrarrojo onda corta	Infrarrojo cercano	1.55 - 1.75	0.85 - 0.88	30	Uso de suelos. Diferenciación de nubes y nieve.	Mapeo geomorfológico y geológico. Agricultura y vegetación.
6		Infrarrojo térmico	Infrarrojo onda corta 1	10.4 - 12.5	1.57 - 1.65	30	Propiedades termales del suelo.	Uso de suelos. Diferenciación de nubes y nieve.
7		Infrarrojo onda corta	Infrarrojo onda corta 2	2.08 (2.09) - 2.35	2.11 - 2.29	30	Identificación de minerales. Mapeo hidrotermal.	Mejora contenido de humedad de suelo y vegetación y penetración fina en nubes.
8	—	Pancromática	Pancromática	0.52 - 0.9	0.50 - 0.68	15	Resolución de 15m. Definición de imagen nítida.	Resolución de 15m. Definición de imagen nítida.
9	—	—	Nubosidad	—	1.36 - 1.38	30	—	Mejora la detección de presencia de nubes en la imagen.
10	—	—	Infrarrojo Termal 1	—	10.60 - 11.19	100 * (30)	—	Resolución de 100m, mapeo termal y estima la humedad del suelo.
11	—	—	Infrarrojo Termal 2	—	11.50 - 12.51	100 * (30)	—	Resolución de 100m, mejora el mapeo termal y estima la humedad del suelo.

A * (B); A=primera resolución, B= última resolución por cada metro de pixel

Fuente: landsatusgs.gov

Tabla 9.- Características técnicas y aplicaciones de las imágenes Landsat 5, 7 y 8.

El Landsat 8, contiene 9 bandas espectrales con resolución espacial de 30 metros para las bandas 1 al 7 y 9. La nueva banda 9 es útil para detectar nubosidad. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Las bandas 10 y 11 son útiles porque proveen información exacta de temperaturas y son recolectadas a 100 metros (http://landsat.usgs.gov/best_spectral_bands_to_use.php).

Permite diferenciar tipos de rocas, planificación hidrológica de cuencas. Con las bandas termales se puede analizar la temperatura en la superficie de la Tierra.

B. Aster

ASTER es un esfuerzo cooperativo entre la NASA y el Ministerio de Comercio Economía e Industria de Japón METI. Este sensor se encuentra a bordo del satélite TERRA.

Este sensor posee 3 sub-sistemas: Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR), el Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) y el Infrarrojo Termal (TIR), que cuentan con una resolución espectral de 3, 6, y 5 bandas respectivamente y resoluciones espaciales de 15 m, 30 m y 90 m para cada subsistema, superando a otros sensores como es el caso de Landsat (Tabla 10).

Las imágenes ASTER al gozar de mayor cobertura espectral, permiten la diferenciación de arcillas y minerales típicos que se encuentran en las zonas de alteración (Rodríguez Aycho, 2008). Se usan las bandas TIR para analizar la temperatura en la superficie de la Tierra. Genera información geológica litológica estructural. Cuenta con 2 bandas estereoscópicas, a partir de las cuales se puede generar modelos digitales de elevación.

Sensor	Subsistema	Banda	Rango Espectral μm (micrómetro)	Resolución Especial	Resolución Radiométrica
ASTER	VNIR (Infrarrojo cercano)	1	0.52 - 0.60 μm	15 m	8 bits
		2	0.63 - 0.69 μm		
		3N	0.78 - 0.86 μm		
		3B	0.78 - 0.86 μm		
	SWIR (Infrarrojo de onda corta)	4	1.600 - 1.700 μm	30 m	8 bits
		5	2.145 - 2.185 μm		
		6	2.185 - 2.225 μm		
		7	2.235 - 2.285 μm		
		8	2.295 - 2.365 μm		
		9	2.360 - 2.430 μm		
	TIR (Infrarrojo termal)	10	8.125 - 8.475 μm	90 m	12 bits
		11	8.475 - 8.825 μm		
		12	8.925 - 9.275 μm		
		13	10.25 - 10.95 μm		
		14	10.95 - 11.65 μm		

Tabla 10.- Características de las imágenes satelitales Aster.

C. Modelo de Elevación Digital

El modelo de elevación se genera de las bandas 3N (Nadir) Y 3B (Back). También se pueden obtener DEMs a partir de varias fuentes como imágenes satelitales de SPOT, QUICKBIRD y LIDAR (Mboin and Yator, 2000).

Ayuda a generar topografía hasta una escala de 1/50,000, generar modelos hidrográficos, geomorfología, ortorectificar imágenes.

D. SRTM DEM (Misión topográfica Radar Shuttle)

Proyecto internacional entre la Agencia Nacional de Inteligencia-Geoespacial, NGA, y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, NASA. El SRTM consiste en un sistema de radar especialmente modificado que voló a bordo del transbordador espacial Endeavour durante los 11 días de la misión STS-99 de febrero de 2000.

Para adquirir los datos de elevación topográfica estereoscópica la SRTM lleva dos reflectores de antenas de radar.

Se usa en el campo de la geomática, como sistema de formación geográfica.

E. Imágenes de Google Earth

Es un programa informático que muestra un globo virtual que permite visualizar múltiple cartografía, con base en la fotografía satelital. El mapa de Google Earth está compuesto por una superposición de imágenes obtenidas por Imagen satelital, fotografía aérea tomadas desde aviones con cámaras especiales de alta resolución. Obtienen imágenes de una variedad de proveedores, algunas de las imágenes son provistas a Google por los gobiernos de las ciudades o estados.

6.3. GEOLOGÍA EN LA EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

6.3.1 Fuente de Calor

Se refiere al calor requerido para la formación de un sistema geotérmico cerca de la superficie, puede ser suministrado por una masa de magma de alta temperatura situada en la corteza terrestre ya sea como una intrusión en proceso de enfriamiento, fallas activas profundas o bien como una cámara magmática que alimentó un volcán o caldera. El rango de edad de preferencia debe ser menor al Mioceno (IGA) y los productos que afloran en superficie tienen que ser de composición ácida pues esto refleja la someridad de la fuente de calor.

6.3.2 Roca reservorio

El reservorio es un volumen de rocas calientes permeables del cual los fluidos circulantes extraen calor. Las características deseadas son que las rocas tengan alta porosidad, permeabilidad y temperatura.

El reservorio está cubierto por rocas impermeables (Capa Sello) y está conectado a un área de recarga superficial (zona de recarga) a través de la cual el agua meteórica puede reemplazar los fluidos que se escapan del reservorio a través de fuentes termales o pozos perforados (Zona de descarga).

6.3.3 Capa sello

Nivel litológico superior al reservorio, puede estar compuesto por una roca con nula o poca permeabilidad. La roca puede ser sedimentaria o volcánica con impermeabilidad primaria o una roca cerrada por autosellamiento debido a efectos prolongados de la actividad geotérmica. Para determinar dicha cobertura es necesario conocer la composición litológica en superficie mediante el cartografiado en campo. En el caso que el nivel se encuentre fracturado los fluidos pueden ascender a la superficie por medio de fallas o fracturas que en superficie se traduce como manifestaciones termales.

6.3.4 Basamento

El basamento corresponde a las rocas más antiguas de la región. Es necesario elaborar una columna litológica de la cuenca o área de estudio para inferir el tipo de rocas que podrían estar bajo el reservorio.

6.3.5 Evidencias hidrotermales

Corresponden a las manifestaciones en superficie de cambios en la roca respecto a la mineralogía, textura y química debido a la circulación de fluidos en presencia de agua caliente, vapor o gas. (<http://www.cec.uchile.cl/~vmaksaev/ALTERACION.pdf>).

6.3.6 Zona de Ascenso (Upflow).

Representada por un área susceptible a ascenso de fluidos, presente en algunos casos en un campo geotérmico.

7. METODOLOGÍA

7.1 IDENTIFICACIÓN DE LA ZONA DE INTERÉS

Es el inicio de la exploración en una región desconocida, también conocida como etapa de pre exploración. Tiene por objeto determinar si una zona concreta, normalmente de gran extensión, presenta posibilidades de que exista un tipo determinado de yacimiento geotérmico (<http://www.uclm.es/users/higuera/yymm/YM14.html>).

Se localiza el área de interés geotérmico que muestre manifestaciones termales o antecedentes de presentar una fuente de calor reciente (Sistema o periodo Plioceno - Cuaternario), la escala que se utiliza es a nivel regional, con mapas geológicos, topográficos y de imágenes satelitales a escala 1:100 000, 1:1 000 000 que tienen la ventaja de permitir una visión de conjunto de grandes regiones. Finalmente, se procede a buscar información que enriquezca nuestro conocimiento en esta zona.

7.2. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

En este caso se recopiló toda la información disponible sobre el área geotérmica que vaya desde el aspecto científico hasta el social. Se procederá a analizar de la siguiente manera (Fig. 3):

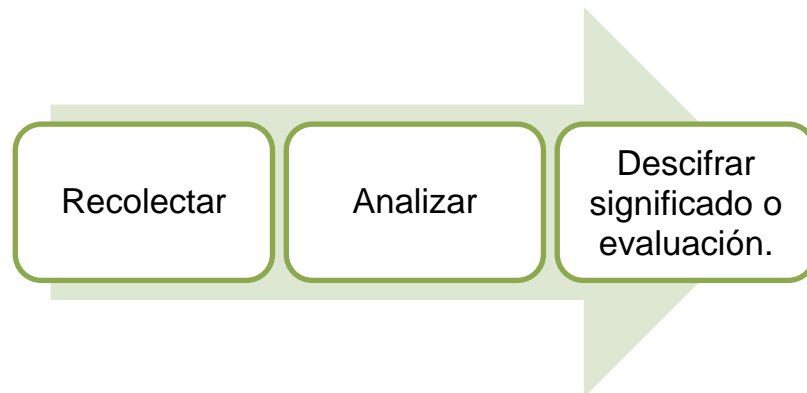


Fig. 3 Proceso de análisis de recopilación de la información

- Recolectar: Toda la información obtenida de libros, tesis, informes en físico o en el internet, son necesarios documentar ordenadamente, resaltando el nombre del autor y título. Se organizan pequeñas fichas de resumen que pueden ser escritas como apuntes o usando programas como Medeley. Todo esto es con el objetivo de organizar la información de manera que sea más fácil de trabajar. Se recolecta información de datos geológicos, información acerca de manifestaciones termales y fumarolas, imágenes satelitales, datos de subsuelo (pozos), información geofísica y geoquímica disponible, meteorología.

- **Analizar:** Analizamos la información para que nos muestren las relaciones, patrones, tendencias. Debe identificarse si los datos son cuantitativos o cualitativos porque deberán ser analizados de diferente forma.
La inspección y evaluación de datos recopilados es clave en la discriminación de la información. Para obtener una información provechosa es conveniente considerar los siguientes conceptos: Aplicabilidad, relevancia y credibilidad (Fig. 4).

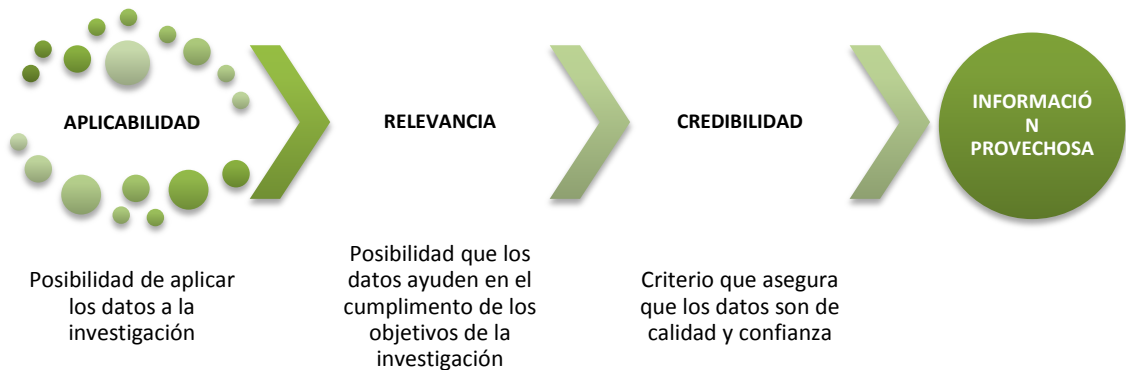


Fig. 4 Conceptos que se deben tener en cuenta para obtener información provechosa.

Descifrar significado (Evaluación): Tomamos en cuenta la información útil que nos ayuda en el desarrollo del trabajo. La información es insertada como referencia durante la redacción.

La información esencial con la que se cuenta para analizar son los estudios previos y mapas geológicos, pues estos serán importantes para un punto de partida base.

7.2.1 Estudios previos

Se toma en cuenta los estudios científicos e investigaciones desarrollados, para conocer hasta qué punto se ha desarrollado en el trabajo y en qué se puede mejorar o ahondar.

7.2.2.1. Regional

Resulta muy útil contar con el apoyo de mapas geológicos regionales, inventarios geotérmicos a nivel nacional, estudios geoquímicos y geofísicos a escala regional, etc., que muestren no solo la localización (y tipología), sino también las relaciones entre ellos y su entorno. Los mapas a escala 1:100 000 son los que más se usan en esta etapa.

7.2.2.2. Local

Los estudios específicos cerca al área de estudio resultan de gran ayuda porque son los que suelen contribuir con mejores datos y a tener en cuenta los detalles. Se usan los mapas a escala 1:25 000 y 1:50 000.

7.2.2 Mapas geológicos

Todo tipo de mapa geológico resulta de gran ayuda, todos los mapas pueden ser sobrepuestos entre sí, analizar las similitudes y discrepancias que puedan presentar entre sí. Las discrepancias resultan interesantes pues son puntos clave para supervisar en el terreno y más aún si coinciden con áreas de interés geotérmico. Además se les compara con mapas DEM e imágenes satelitales, todas estas comparaciones son útiles para el cartografiado.

7.3. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Una vez enriquecido el conocimiento sobre la zona de interés, la persona puede tener el criterio para delimitar una o más áreas de estudio dentro de la zona de gran extensión anteriormente planteada. Esta área (s) de estudio contiene variables de nuestro interés y según los antecedentes conocidos en la recopilación bibliográfica tiene grandes probabilidades de ser rentable geotérmicamente.

En esta etapa se delimita el área de estudio con coordenadas geográficas o UTM, en nuestros casos tenemos en cuenta las coordenadas geográficas para unir nuestros datos con cada país. Pero al trabajar individualmente se tendrá en cuenta el sistema de georeferenciación adecuado de cada zona, especificando antes elaborar el mapa. Si el área es pequeña <1000km² se trabajará a escala 1:50 000.

7.4. ASPECTO SOCIAL Y AMBIENTAL

Bajo la primicia de que el medio ambiente es el entorno en el cual una organización opera, incluyendo el aire, agua, tierra, recursos naturales, flora, fauna, los seres humanos y sus interrelaciones; la recopilación ambiental básica tendrá como fin prever, identificar y minimizar los posibles impactos ambientales durante la etapa de campo, así mismo promover el desarrollo económico y social del área de estudio.

Con base en información proveniente de informes, prensa, artículos, mapas, bases de datos disponibles, publicaciones de aspectos culturales y/o ambientales de la zona de estudio. Esta primera información será útil para el levantamiento de la línea base y se basa en los siguientes objetivos:

- Identificar si existe grupo(s) étnico(s) en el área de estudio.
- Conocer su actividad económica.
- Reconocer alguna de las necesidades básicas en la población (agua potable, energía, vivienda, etc.), si existiere.
- Señalar si el área se encuentra dentro de un parque, reserva o área ecológica.
- Identificar las cuencas hidrográficas y conocer cuáles son sus características y evolución con el tiempo.
- Identificar si existen peligros naturales a los que estén expuestos.
- Conocer fauna y flora presente en el área y si alguna especie se encuentra amenazada.
- Informar de las actividades que se llevarán a cabo en el sitio de estudio.

Este trabajo previo la etapa de campo permitirá avanzar con el trámite de permisos ambientales para optimizar tiempo (Fig. 5).

El proceso para el análisis es el siguiente:

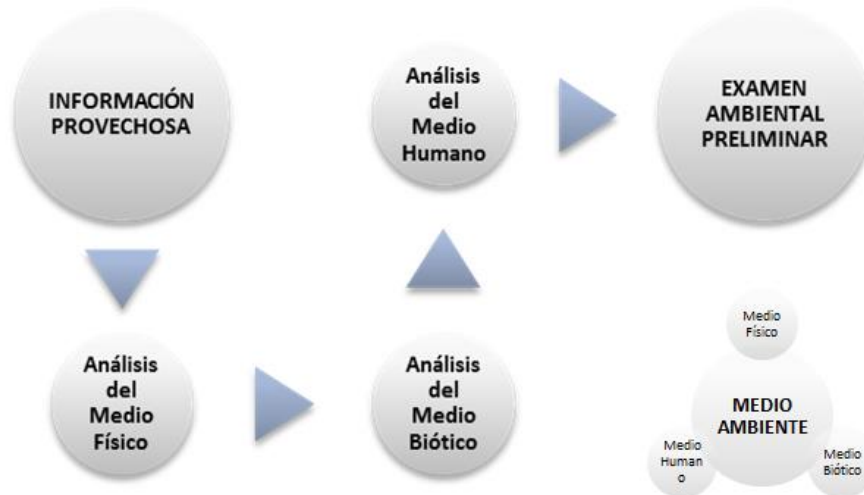


Fig. 5 Proceso para el optimizar tiempo de avance de los permisos ambientales.

- Medio físico: Describe los elementos de agua, aire y tierra. Se nombra brevemente las características hidrológicas (superficiales y subterráneas), atmosféricas (calidad del aire y ruido) y geológicas (recursos minerales, deslizamientos, erosión) del área de estudio.
- Medio Biótico: Describe los elementos acuáticos y terrestre. Se nombra de manera general la flora y fauna que involucra la zona.
- Medio Humano: Describe los elementos sociodemográficos, económicos y de servicio e infraestructura. Direccionado a conocer la actividad económica de la zona en estudio.

Se considera que algunos datos de los mencionados pueden tardar un tiempo considerable en adquirirlo o podría requerir de varios meses de estudio para obtener información (recurso hídrico subterráneo, recursos minerales, demografía, servicios e infraestructura, etc.), sin embargo se nombra para guía y conocimiento del lector.

Los datos de referencia pueden ser presentados como mapas, cuadros, gráficos, tablas, bases de datos, o en otros formatos según sea apropiado.

7.5. ANÁLISIS DE TELEDETECCIÓN

En este trabajo se procede a realizar una integración y procesamiento de los datos previamente recopilados y las imágenes con las que se dispone, mediante el uso de sistemas informáticos de manejo de datos del tipo denominado Sistema de Información

Geográfica (GIS). La integración y procesamiento se orienta a la determinación de las características geológico-estructurales de las zonas de estudio, y un posterior procesamiento de las imágenes para lograr la identificación de alteraciones hidrotermales y anomalías térmicas presentes.

7.5.1 Análisis geológico estructural

Durante la investigación de cualquier zona termal se tendrá que investigar la relación que existe entre las estructuras volcánicas y las estructuras tectónicas, a fin de conocer la posible ocurrencia, a poca profundidad, de cuerpos magmáticos calientes (OLADE, 1994), los cuales dentro de un sistema geotérmico, se traducen como la fuente de calor. Es fundamental identificar los controles estructurales presentes, para poder interpretar la estructura y dinámica global del yacimiento geotérmico.

La metodología implementada para el análisis geológico estructural de cada uno de los casos de aplicación, persigue el objetivo de elaborar un mapa base geológico-estructural de la zona de estudio. Esto se realizará una vez elegida la escala de estudio de trabajo. La secuencia de trabajo implementada es (Fig. 6):

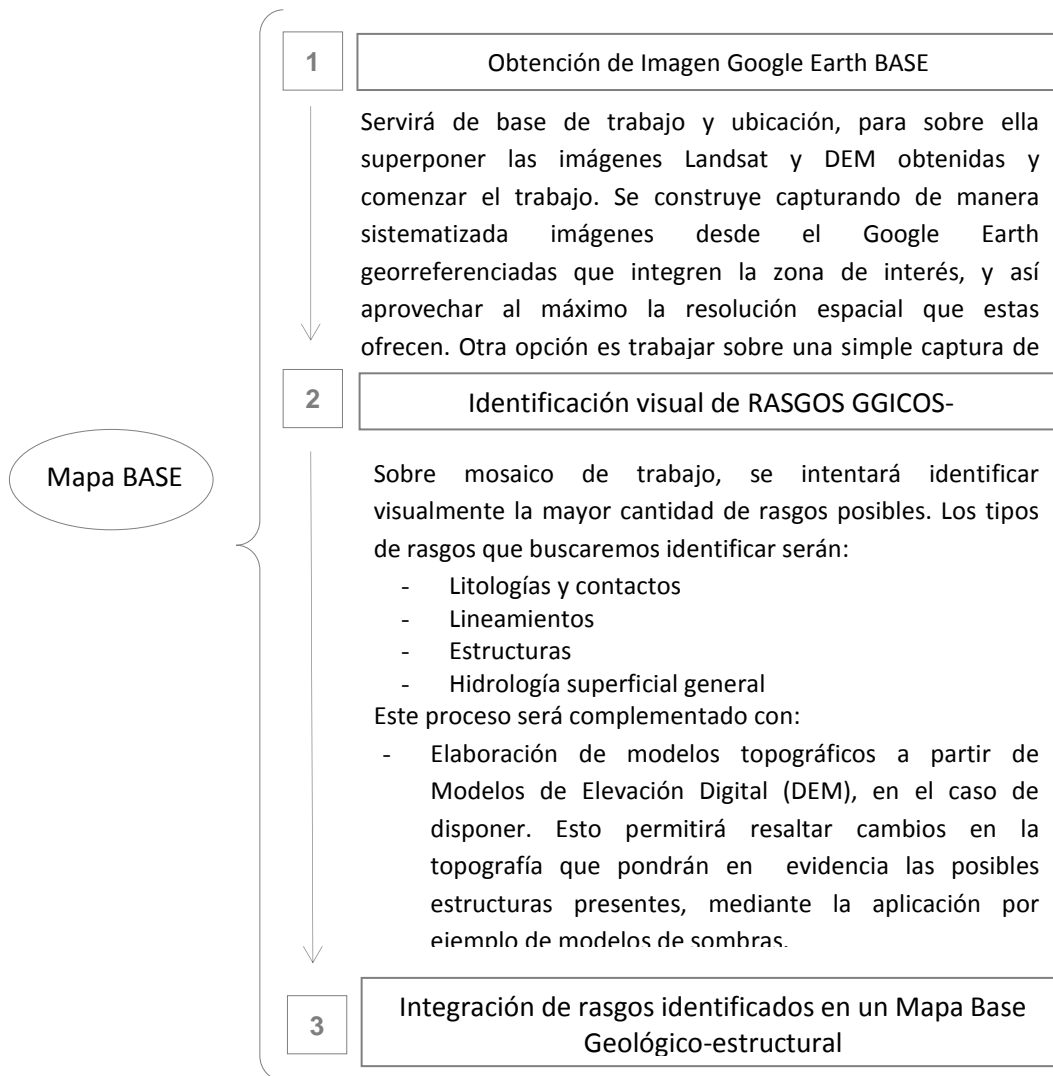


Fig. 6. Esquema de trabajo para la obtención de un mapa base.

7.5.2 Procesamiento de Imágenes Satelitales

Para el procesamiento de Imágenes se procede a utilizar el mismo sistema informático de manejo de datos (GIS). En él se cargarán las imágenes satelitales disponibles, junto con el mapa base elaborado, debidamente georreferenciados. Luego se procede a aplicar las metodologías para realizar la identificación de alteraciones de tipo hidrotermal y mineralizaciones asociadas, y anomalías térmicas. El procedimiento para el procesamiento de las imágenes que se dispongan, será el siguiente (Fig. 7):

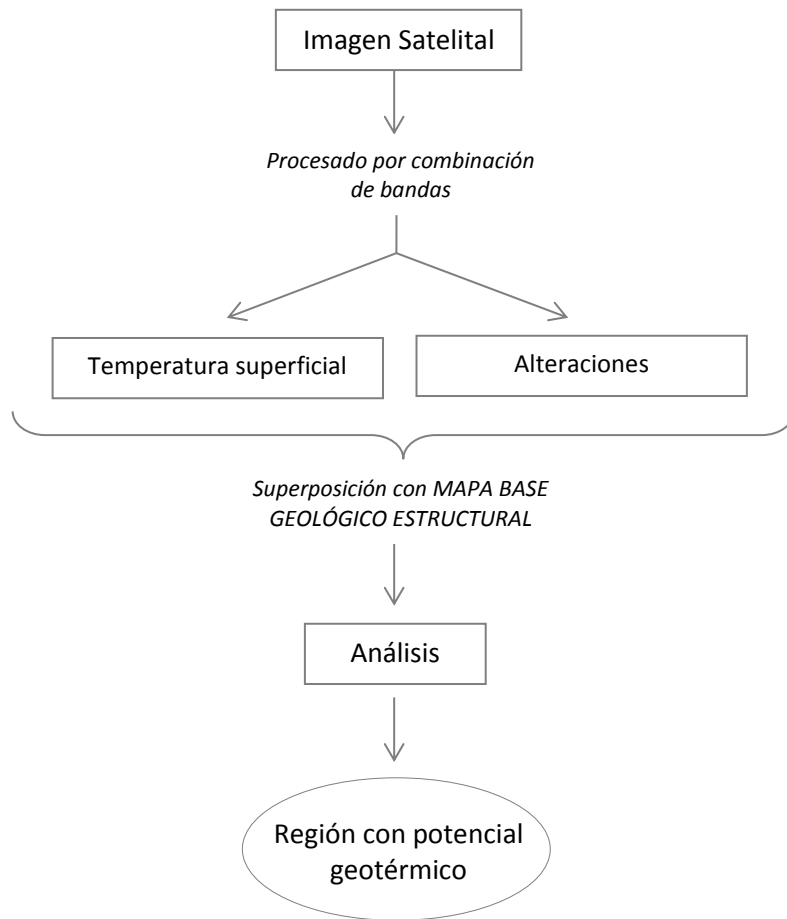


Fig. 7. Secuencia de trabajo para delimitación de anomalías térmicas y alteraciones hidrotermales superficiales a partir de técnicas de teledetección.

7.5.2.1. Delimitación de alteraciones hidrotermales

Cuando los productos de alteración hidrotermal están expuestos en la superficie, pueden ser mapeados como un patrón zonal. La importancia del reconocimiento de tales patrones espaciales de alteración hace a la técnica de teledetección uno de los procedimientos estándar en la geología de exploración, debido a su alta eficiencia y bajo costo.

Los principales tipos de alteración que se encuentran en zonas volcánicas son las facies argílica, filítica y propilítica, asociadas muchas veces a procesos de alteración de silificación y potásicas. Cada tipo de alteración tiene minerales diagnósticos en sus respectivas rocas. Las imágenes de satélite juegan un papel eficaz en la diferenciación de los minerales representativos de los diferentes tipos de alteraciones (Mia and Fujimitsu, 2012).

Para resaltar dichos rasgos, se procede a realizar combinaciones de bandas que resalten los minerales de facies propias de actividad hidrotermal.

Tres colores (es decir, rojo, verde y azul, RGB) serán utilizados para mostrar bandas multiespectrales en el método de composición de color donde la respuesta espectral de los minerales asociados a alteraciones hidrotermales indica un máximo en su reflectancia. Las bandas a utilizarse para combinar y realizar la composición de falso color, dependerá de las imágenes que se dispongan (Mia and Fujimitsu, 2012). Por ejemplo, para el caso de las imágenes Landsat 8, las bandas a visibles a combinar serán las 2, 3 y 4 correspondientes al azul, verde y rojo visibles.

7.5.2.2. Delimitación de anomalías térmicas

La identificación de anomalías de calor se puede realizar mediante el análisis de la temperatura superficial de acuerdo a la apariencia natural y los valores digitales de las imágenes. En ese caso las zonas más claras con valores digitales altos, se traducen en zonas más calientes y viceversa.

Para encontrar la temperatura de la superficie, necesitamos hacer el procesamiento de imágenes.

Para ello se trabaja con las bandas térmicas de las imágenes. Las bandas utilizadas dependerán del tipo de imágenes que estemos utilizando. Para todos los casos, los valores de la banda térmicas que debemos utilizar corresponden a longitudes de onda de energía emitida de 3-5 μm y 8-14 μm , valores que ponen en evidencia los cambios de temperatura superficial. Por ejemplo, para el caso de imágenes Landsat 8, sus bandas térmicas corresponden a las bandas 10 y 11 respectivamente. La secuencia de análisis utilizada es la siguiente (Fig. 8):

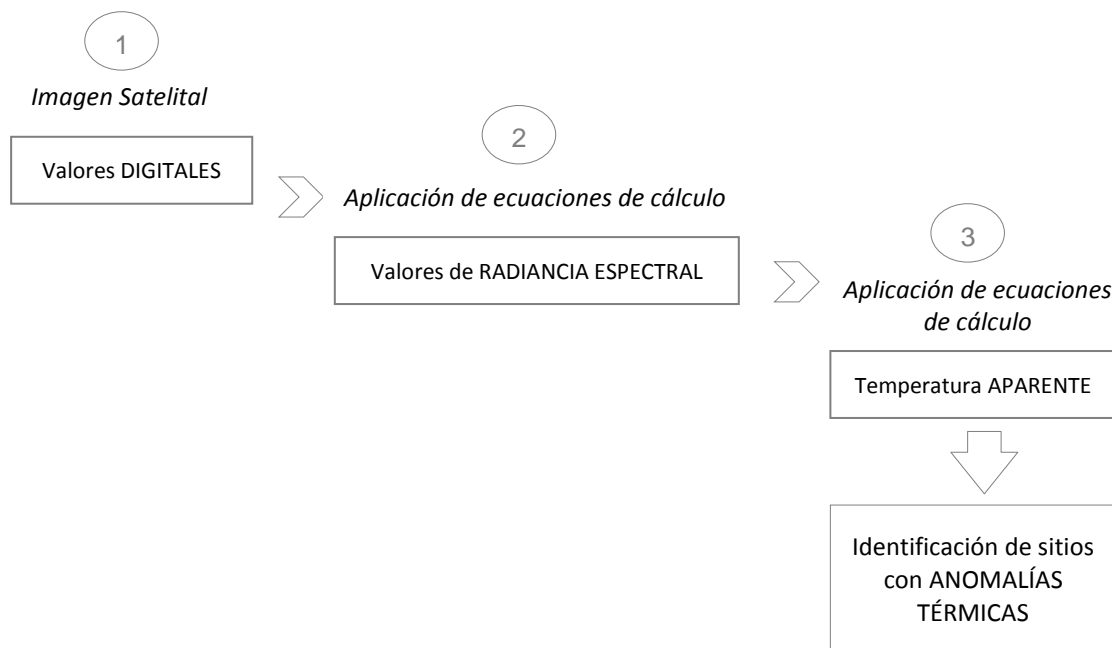


Fig. 8. Secuencia de trabajo para la delimitación de anomalías térmicas.

El objetivo inicial del procesamiento es poder convertir los valores digitales de las imágenes en valores de radiancia, para poder realizar el cálculo de la temperatura aproximada superficial.

Para ello se procede a convertir el ND (número digital) de la imagen a valores de radiancia espectral (Siahaan et al., 2011). En GIS se procede a la herramienta de Toolbox y luego a la opción de Map, Raster Calculation. Aquí me aparece la opción de realizar cálculos seleccionando las bandas térmicas con las que se desee trabajar; y se ingresan las siguientes fórmulas:

$$\text{"Radiancia Espectral de BX"} = (\text{"Radiancia_Mult_Band_X"} \times \text{"BX.tif"}) + \text{"Radiancia_ADD_BAND_X"}$$

Luego, para el cálculo de la "Temperatura aparente" se trabaja en la misma herramienta de Toolbox, con la siguiente fórmula:

$$[\text{Temp_BX.tif}] = K2_CONSTANT_BAND_X / \ln((K1_CONSTANT_BAND_X / [\text{Spec_rad_B\"X\".tif}] + 1))$$

Finalmente, para poder plantear sitios de interés geotérmico, se procede a categorizar los valores de temperatura aparente en rangos, para lo cual se utilizará la herramienta Toolbox → Reclassify. Esto permitirá resaltar a simple vista aquellos puntos con valores de temperatura aparente interesantes.

7.6. ANÁLISIS DE ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS

El trabajo de investigación contempla la búsqueda de información complementaria, en disciplinas afines a la geotermia, que sean de utilidad para enriquecer la estructura del modelo geológico conceptual preliminar.

La información complementaria proviene principalmente de estudios geoquímicos y geofísicos publicados en artículos científicos, informes, libros, tesis, páginas web, etc. La información adquirida procede de estudios que no necesariamente han enfocado sus investigaciones en geotermia; sin embargo los datos recolectados en dichas investigaciones, son útiles para un análisis y enfoque geotérmico.

Consecuentemente se realiza el procesamiento de datos, haciendo uso de diagramas, tablas, gráficos, etc., para un mejor análisis. Para el caso de datos geoquímicos, dependiendo la cantidad de datos adquiridos se hace uso de gráficos que ilustran modelos de mezcla, composición de los fluidos, áreas de recarga (isótopos) y lo fundamental, determinación de temperaturas en profundidad. Los datos se procesan en AquaChem (software de Schlumberger) o también se los puede procesar mediante la publicación de Tom Powell (2010) de acceso libre: "Spreadsheets for Geothermal Water and Gas Geochemistry; Constructing Geothermometry Reports" (<https://catalog.data.gov/dataset/spreadsheets-for-geothermal-water-and-gas-geochemistry-constructing-geothermometry-reports>).

En Geofísica el uso de software es indispensable e inevitable para el procesamiento de datos; existen programas informáticos especializados para el análisis de datos, dependiendo del tipo de técnica realizada en el estudio (Gravimetría, Magneto-telúrico, Sísmica, etc.), generalmente el más usado en geotermia es WinGLink (software de Schulumberger) debido a que permite integrar varias disciplinas geofísicas.

7.7. INTEGRACIÓN DE DATOS

La integración de los datos se realiza de forma secuencial y coherente con la información geológica. Consecuentemente se elabora mapas (a escala 1:100 000 o mayor) que constan de ubicación, características de las manifestaciones geotermiales, topografía, vías de acceso, otras infraestructuras, geología y/o geoquímica y/o geofísica, estos dos últimos en la medida que se disponga los datos.

La finalidad de integración es:

- Obtener una percepción general de la estructura del sistema geotérmico.
- No replicar análisis que se han elaborado en estudios previos.
- Zonificar las áreas con mayor interés para la etapa de campo.
- Planificar logística de acuerdo al área de estudio.
- Conocer las características, sociales, culturales y ambientales de la zona.
- Mejorar el destino del recurso económico.

Finalmente se elabora un modelo geológico preliminar del sistema geotérmico en el área de interés.

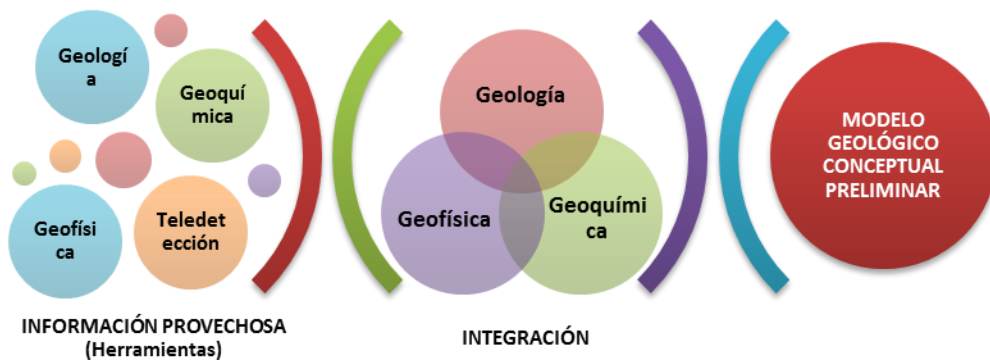


Fig. 9. Secuencia de trabajo para la elaboración del modelo geológico conceptual preliminar.

7.8. MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo geológico conceptual preliminar es una representación cualitativa, en planta y perfil, de las componentes geológicas del sistema geotérmico, consistente con los datos e información recopilada a ser comprobadas en campo. Su información geológica y tectónica se usa como base para las consideraciones finales en el modelo conceptual integrado.

Los mapas en planta están debidamente georreferenciados y las secciones se presentan a la misma escala del mapa para una mejor comprensión. El modelo presenta los siguientes aspectos:

- Estima cuál sería la fuente de calor.
- Representa cronoestratigrafía y estructuras geológicas.
- Estima la profundidad del reservorio y capa sello.
- Identifica cuáles son potenciales acuíferos.
- Señala si las estructuras controlan la circulación de los fluidos.

8. ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

8.1. ARGENTINA

8.1.1. Ubicación Geográfica y características generales

La zona de trabajo se encuentra ubicada en el noroeste de la provincia de Neuquén, sector norte de la Patagonia argentina. Integra la provincia geológica denominada “Engolfamiento Neuquino”, al oeste de la “Cordillera Principal”. Se encuentra dentro del departamento Chos Malal. Pertenece al Área Natural Protegida del Sistema Domuyo de reciente creación. Corresponde más específicamente al flanco occidental del Cerro Domuyo, de coordenadas $36^{\circ}34'49.06''\text{S}$ y $70^{\circ}25'15.71''\text{O}$ (Fig. 10).

La zona de estudio se halla comprendida entre los paralelos $36^{\circ}34'14.7''$ y $36^{\circ}45'47.3''$ de latitud sur, y entre los meridianos $70^{\circ}28'28.2''$ y $70^{\circ}38'08.3''$ de longitud oeste, abarcando un área aproximada de 307 km^2 .



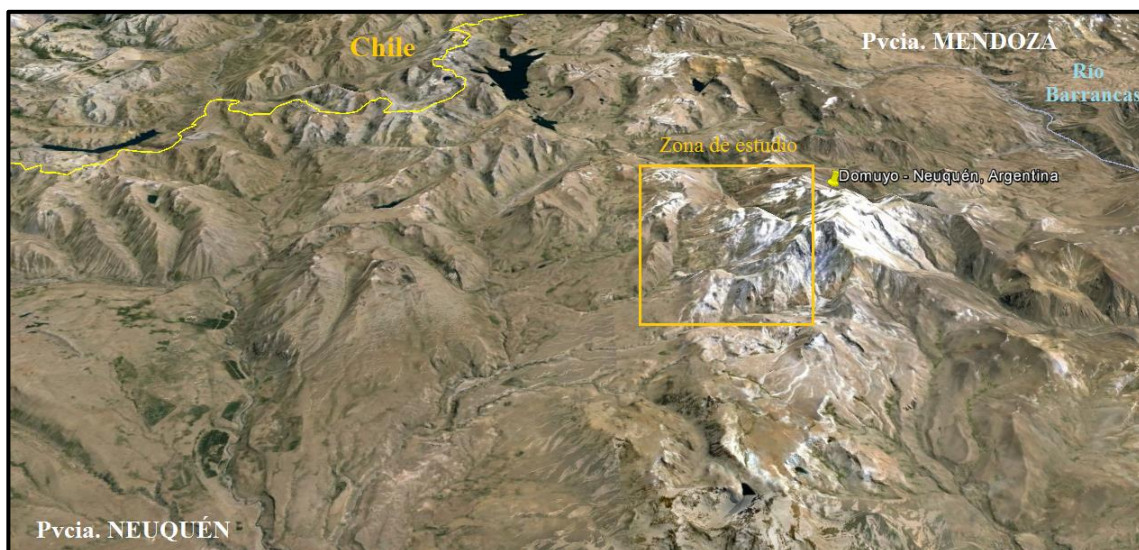


Fig. 10 Superior e inferior. Ubicación de zona de estudio. Caso de aplicación: Argentina

Las inmediaciones a la zona de trabajo se hallan mayormente despobladas, salvo por dispersos puestos de veranada durante los meses de verano. La actividad principal del departamento es la ganadería extensiva, y gran parte de ésta se caracteriza por ser de uso estacional (veranadas). Existe también un importante núcleo de plantaciones forestales.

Con respecto al clima, es de tipo riguroso, con inviernos muy fríos e intensas nevadas. Es templado seco en verano y frío seco en invierno. La temperatura media anual es de alrededor 11°C. Las precipitaciones anuales son de 150 mm. y los vientos del noroeste soplan con más frecuencia en primavera y verano. El hecho de que gran parte del área se encuentre por encima del nivel de nieves permanentes favorece el accionar de los procesos glaciarios.

La red fluvial principal de la región se halla integrada por cauces exorreicos de carácter autóctono que forman parte de las nacientes de dos cuencas hídricas diferentes: la "alta cuenca del río Colorado" hacia el sector oriental y la "alta cuenca del río Neuquén" hacia el sector occidental, limitadas éstas por las cumbres de una serie de cerros, entre ellos el cerro Domuyo, los cuales conforman la parte activa de sus respectivas cuencas, y sus aportes son principalmente de origen nival. El cerro Domuyo se comporta como un centro dispersor, formando una red de drenaje de tipo radial divergente que recibe el aporte de arroyos subsecuentes que se acomodan a la estratificación de las sedimentitas mesozoicas. Inmediatamente aguas abajo de sus sectores cabeceras, los cursos de aguas principales adquieren una disposición controlada por los sistemas de fracturas y fallas que afectan al área. Estos cursos de agua son de régimen permanente y tienen su origen en el derretimiento de glaciares y/o nieves permanentes. Los valles fluviales no presentan gran desarrollo, y conforman un estado incipiente (ver Apéndice 1).

Con respecto a las características geomorfológicas del área, existe un paisaje compuesto, que consiste en una comarca montañosa de relieve escarpado, influenciada fuertemente por procesos ígneos que han impuesto sus características al

modelado final. Los procesos que intervinieron en el modelado del paisaje fueron de *acción fluvial*, de *remoción en masa*, *glaciaríos* y *volcánicos*. El cerro Domuyo está compuesto por un cuerpo subvolcánico aflorante, de techo casi plano y paredes muy escarpadas, rodeadas por contrafuertes de pendientes fuertes a moderadas que inclinan periclinalmente respecto de su cumbre. La zona de estudio pertenece al flanco occidental del mismo.

A modo de introducción, se puede decir que en la zona de trabajo existen varias manifestaciones termales, entre ellas la denominada Los Tachos ubicada sobre los cursos medios de los arroyos Manchana Covunco y Covunco respectivamente, y las manifestaciones de Aguas Calientes, que dan su nombre a la villa homónima, esta última fuera del área local de trabajo. Además se identifican las manifestaciones de La Bramadora ubicada sobre tributarios del Arroyo Negro, El Humazo sobre el Arroyo Manchana Covunco. y Rincón de Las Papas.

8.1.2. Antecedentes

Son relativamente escasos los trabajos realizados en el cerro Domuyo, posiblemente como consecuencia del fuerte aislamiento de la zona que hasta hoy perdura, el clima adverso y las grandes precipitaciones níveas en invierno, la altura y el escarpado relieve que posee.

Entre los primeros escritos se halla la ascensión al pico Domuyo del padre Lino Carbajal (1906), en el cual se hacen las primeras referencias a la geología y geomorfología del mismo. Groeber (1946) es el primero en discutir la edad del intrusivo del Domuyo, su condición de volcán desmantelado y su relación con el amplio magmatismo terciario desarrollado en el norte neuquino. Luego, los trabajos de Llambías et al. (1978 a y b) sobre la estratigrafía y petrología del volcán Domuyo y áreas adyacentes proponen un magmatismo predominantemente andesítico con la implantación de centros eruptivos ácidos hacia el Mioceno superior-Pleistoceno inferior. Luego, Brousse y Pesce (1982) analizan la estratigrafía en el flanco SO del cerro Domuyo y sus inmediaciones, proponiendo un volcanismo cuaternario para el cerro Domo y adyacencias, asociado a un sector térmicamente anómalo puesto en evidencia por las manifestaciones de aguas termales y fumarolas de la zona.

Los principales trabajos con énfasis en la estructura y tectónica de las regiones adyacentes a la zona en estudio son los de Braccini (1970), Kozłowski et al. (1990, 1993 y 1996), Manceda y Figueroa (1993), Mingramm et al. (1993), Dimieri y Nullo (1993), Nocioni (1994, 1995 y 1996) y numerosos informes inéditos de compañías petroleras. Kozłowski et al. (1996), Cruz et al. (1996) y Zapata et al. (1999) contribuyen con perfiles estructurales en la región inmediatamente al sur.

Trabajos sobre la evolución tectónica del área se deben a Uliana et al. (1989) y Franzese et al. (2003) que analizan la extensión mesozoica que generó la cuenca Neuquina, mientras que los trabajos de Cobbold y Rosello (2003) y Folguera et al. (2002 y 2006a) contribuyen al entendimiento de la evolución cenozoica del área.

Los siguientes estudios se focalizaron en las posibilidades geotérmicas de este sector, y entre ellos se encuentran los trabajos realizados por la *Japan Internacional*

Cooperation Agency (1983). *Pesce* (1987) propone para el magmatismo cuaternario un régimen tensional favorecido por estructuras de tipo graben. Finalmente, *Miranda* (1996) en su tesis de licenciatura propone para el intrusivo del Domuyo la evolución de un cuerpo subvolcánico altamente viscoso y su relación con cuerpos dómicos satelitales, aportando edades radimétricas mínimas para este intrusivo, que lo asignan al Plioceno superior.

8.1.3. Marco Geológico Regional

Andes Centrales de Sudamérica

“Descripción de patrones cinemáticos de deformación”

La región de estudio se encuentra enmarcada dentro del segmento sur de los Andes Centrales (Gansser, 1973), segmento ubicado entre las latitudes 27°S y 46°30'S, y se caracteriza por ser un orógeno de tipo Andino (sensu stricto), formado por subducción de corteza oceánica (Ramos, 1999c).

La historia tectónica de este segmento estuvo caracterizada por variaciones en la geometría de la zona de Wadati-Bienoff (Ramos, 1999c). Para esta zona se sugieren distintos segmentos en base a variaciones en los patrones cinemáticos de la deformación a lo largo del borde de placa para los últimos 5 Ma, caracterizándolos según las diferentes maneras en que el vector de convergencia oblicuo al borde de placa se ha particionado en desplazamiento de rumbo paralelo a la trinchera y deformación ortogonal a la trinchera (Dewey y Lamb, 1992) (Tabla 11 y 12).

		Latitudes	Patrón cinemático
ANDES CENTRALES	SEGMENTO NORTE	20°S - 39°S	Acortamiento andino ortogonal al límite de placas y una muy pequeña componente de desplazamiento de rumbo en la zona del retroarco.
	SEGMENTO DE TRANSICIÓN	34°S - 39°S (Área de estudio)	Sistema de transferencia dextral, casi ortogonal a la trinchera, que deflecta la misma y al arco volcánico, y absorbe el diferente desarrollo de componente ortogonal entre los dos segmentos norte y sur
	SEGMENTO SUR	39°S - 47°S	Desplazamiento dextral paralelo al margen en sistemas de fallas transcurrentes (Sistema de Fallas de Liquiñe-Ofqui), rotación de bloques en el antearco y nula deformación en el retroarco durante los últimos 5 Ma.

Tabla 11. Patrones cinemáticos de los segmentos de Ande Centrales según Dewey y Lamb, 1992.

ZONA DE TRANSICIÓN 34°S - 39°S (Área de estudio)	
Factor de control de mecanismo de deformación	Parece haber estado relacionado a cambios en la geometría de la zona de Wadati-Benioff durante los últimos 30 Ma, que han producido diferentes grados de acoplamiento en el sistema subductivo y por lo tanto diferentes mecanismos de deformación, los cuales han quedado registrados en los sectores más internos de los Andes Neuquinos (Folguera et. al., 2002).

Geometría de subducción	<p>Ángulo de subducción de 30° al E. Vector de convergencia oblicuo. Velocidad de subducción constante. Relleno sedimentario de trinchera: 1 km. Pendiente continental amplia: da lugar a grandes cuencas sedimentarias en antearco (Jordan et. al., 1983).</p> <p><u>Hacia el sur:</u> aumenta su inclinación de subducción, hasta casi 40° (López et. al., 1997), disminuye edad y flotabilidad de corteza oceánica. Esto provoca variaciones latitudinales en el grado de partición de la deformación (Folguera et. al., 2002).</p>
Vulcanismo	<p>Corresponde a la Zona Volcánica Sur (ZVS) de los Andes Centrales (33°30'S- 46°30'S), que comprende una cadena de estratovolcanes activos cenozoicos tardíos, situados principalmente en el sector chileno de la Cordillera Principal.</p> <p>Caracterizado por influencia cortical y rocas de composición andesítica a dacítica (López Escobar et. al, 1995).</p> <p><u>Hacia el sur:</u> predominan basaltos y andesitas asociadas a centros efusivos controlados por fallas de desplazamiento de rumbo, asociadas a la zona de falla de Liquiñe-Ofqui (Hervé, 1994).</p> <p><u>Hacia el norte:</u> hacia la región de antepaís, se desarrolla un extenso vulcanismo básico alcalino de retroarco.</p>
Marco tectónico regional	<p>Tectónica del Neógeno controlada por la segmentación de la Placa Nazca y la variación en la edad de la corteza oceánica subductada.</p> <p>Para latitudes del área de trabajo se asocian edades mayores del fondo oceánico con respecto al segmento sur, lo cual define raíces corticales de 57 km de espesor, acortamiento orogénico de 90 km.</p> <p>Hacia el sur, menores edades en el fondo oceánico se traducen en menores acortamientos y espesores de raíces corticales (Introcaso et. al, 1992). Esto provoca variaciones en los mecanismos de deformación a distintas latitudes.</p>

Tabla 12. Caracterización de zona de transición.

Evolución tectónica

A continuación se describen los ciclos de evolución tectónica que tuvieron mayor incidencia en la zona de estudio:

CICLO EXTENSIONAL GONDWÁNICO (290-250 Ma. Carbonífero temprano-medio-Triásico tardío-Jurásico temprano):

Luego del ciclo famatiniano durante el Paleozoico temprano, caracterizado por la acreción de terrenos al proto-margen de Gondwana, sucedió el ciclo extensional Gondwánicos representado por un orógeno de tipo andino que se generó por subducción normal de corteza oceánica a lo largo del borde pacífico (Ramos, 2000). A lo largo de este ciclo se desarrollaron dos grandes pulsos magmáticos asociados a cambios en la tectónica regional, que han afectado de manera directa en la geología de la zona de estudio. Quedan registrados un *primer ciclo magmático*, conocido como pre-Choiyoi (Ramos, 2000), desarrollado entre el Carbonífero tardío y el Pérmico temprano, y compuesto por una intensa actividad magmática que estuvo representada en sus

primeras fases por rocas de composición básica a intermedia, de naturaleza orogénica, (Poma y Ramos, 1984; Kay et al., 1989; Ramos 1999b).

Un segundo evento magmático, agrupado como vulcanitas de Choiyoi. De gran amplitud areal, desarrollado entre el Pérmico tardío y el Triásico temprano, representado por plutones de composición más silícea y alcalina que sus predecesores (Mpodozis y Kay, 1992; Ramos, 2000), calderas, vulcanitas y depósitos piroclásticos que conforman extensos plateaux riolíticos. Habría estado relacionado con una posible disminución en la velocidad de convergencia que condujo a un régimen extensional generalizado que caracterizó al Pérmico tardío y al Triásico (Ramos, 1999b) al cual se asocia un régimen de fallamiento extensional activo, contemporáneo con el comienzo de ruptura del supercontinente Pangea (Ramos, 2000). En este momento comienzan a desarrollarse *cuencas de rift triásicas* a lo largo de las antiguas suturas, y en el labio superior, entre los terrenos acrecionados durante el Paleozoico temprano (Ramos, 1999b). *La cuenca Neuquina*, presente en la zona de estudio, se inició de esta manera como una serie de fosas tipo rift interconectadas, y evolucionó durante el Jurásico y Cretácico como una cuenca de trasarco afectada por episodios de inundación marina desde el océano Pacífico a través de vías marinas desarrolladas entre islas volcánicas de un incipiente arco magmático (Legarreta, 2002).

- CICLO PATAGONÍDICO (CRETÁCICO):

Continúa la extensión cretácica asociada al comienzo de apertura del Atlántico Sur. Hacia el Cretácico medio (115 Ma) estas cuencas comienzan a cerrarse bajo un incremento de la velocidad de convergencia relativa y la instalación de un régimen de subducción tipo Chileno, asociado a la ruptura final del Gondwana y al comienzo de la etapa de deriva. Comienza la inversión tectónica de los sistemas extensionales previos, principalmente en la región preandina de la provincia de Neuquén (Ramos, 1999b), dando lugar al primer pulso compresivo importante para el Cretácico Tardío, y la fase principal de levantamiento de Cordillera del Viento y de la faja plegada del Agrio. Tanto la estructura de Cordillera del Viento (Kozlowski *et al.*, 1996, Zapata *et al.*, 1999 y 2002) como del cerro Domuyo tienen asociadas estructuras de segundo orden donde la cubierta sedimentaria jurásico-cretácica se halla deformada en pliegues apretados. Este es el caso de los pliegues en el flanco sur del cerro, directamente relacionados con la falla Domuyo, y los del sector flanco noroccidental, expuestos en ambos márgenes del arroyo Turbio.

- CICLO COMPRESIONAL ÁNDICO (45-0 MA.):

Durante parte del Paleógeno, el vector de convergencia fue muy oblicuo con respecto a la mayor parte del margen andino argentino-chileno, produciendo la formación de sistemas transcurrentes. La deformación de la región de intraarco y el consecuente levantamiento de la Cordillera Principal se habría desarrollado desde el Cretácico tardío hasta el Eoceno temprano (Zapata y Folguera, 2005).

Con posterioridad al Eoceno, comenzó una etapa con alternancia de estilos tectónicos para los Andes situados entre los 36°S y 39°S, que ha sido mejor explicada por

variaciones en el tiempo en la configuración de la zona de Wadati-Benioff (Ramos y Folguera, 2005b).

Para el Mioceno medio a tardío, se registra una nueva fase compresiva, que produce cierre de cuencas e inversión tectónica de las fallas normales previas. La horizontalización de la zona de subducción habría sido máxima al norte del lineamiento Cortaderas (~37°30'S) (ver Apéndice 3). Al sur del lineamiento Cortaderas, el arco habría tenido una migración muy leve, del orden de una decena de kilómetros. Esto provocaría en la zona de transición un estilo tectónico complejo. En la zona de estudio, este segundo pulso queda registrado en las secuencias volcánicas miocenas medias a tardías de la Formación Charilehue presentes en el área de estudio (17 a 15 Ma), que cubren en discordancia a las sedimentitas mesozoicas plegadas alrededor del cerro Domuyo y al este de Cordillera del Viento. Inmediatamente al este de la falla Curileuvú, la Formación Charilehue está plegada en forma amplia conformando los flancos de cuatro domos tectónicos alineados aproximadamente en dirección norte (Folguera et al., 2007), entre ellos el cerro Domuyo, posiblemente relacionados temporalmente entre sí. El pulso compresivo estaría restringido entre los 15 y 12 Ma de acuerdo a Kay et al. (2006) y Folguera et al. (2007). En el sector sudoccidental al cerro Domuyo, el último período de deformación quedó registrado en una serie de fallas menores que cortan un cuerpo intrusivo pleistoceno tardío asociado a la Riolita Cerro Domo, y las cuales se relacionan a la actividad de la falla Manchana Covunco. Esta última, continuación septentrional de la falla Atreuco, fue considerada por Folguera et al. (2007) como un retrocorrimiento con pequeño desplazamiento de rumbo dextral.

A partir del Plioceno temprano, nuevamente se produce el retiro del frente volcánico hacia la trinchera hasta su posición actual. Una estructuración transtensional en la zona de arco y retroarco interno dominó la región al sur del lineamiento Cortaderas. Al norte del lineamiento Cortaderas, la tectónica extensional quedó registrada por el fallamiento normal y la generación de hemigrábenes según antiguas estructuras.

Durante el Pleistoceno-Cuatrnario, la estructuración se caracterizó por una importante componente de desplazamiento de rumbo a medida que el arco magmático seguía su migración hacia la trinchera hasta su posición actual en la vertiente chilena. Se registró reactivación de fallas normales, asociadas a conos basálticos alcalinos, fallas transtensivas, y fallas transpresivas en su borde NE. En la región de retroarco interno, al sur del lineamiento Cortaderas, la zona de falla de Antiñir-Copahue posee evidencias neotectónicas de desplazamiento de rumbo dextral. Esta estructura transfiere el movimiento de la zona de falla de Liquiñe-Ofqui al lado argentino de la Cordillera Principal.

8.1.4. Marco Geológico Local

Marco estructural local y estructuras asociadas

En general se puede decir que la zona de estudio está asociada una estructura de subsuelo dominada por bloques de basamento rotados y ascendidos aprovechando zonas de debilidad previamente instaladas durante la fase extensional que dio apertura

a la cuenca Neuquina. La estructura tiene en general vergencia oriental salvo por menores retrocorrimientos de vergencia opuesta que responden a nuevas fallas desarrolladas con ángulos menores. La zona de estudio abarca distintos dominios estructurales principales, cuyas características principales se describen en la Tabla 13, y que se pueden apreciar en el Apéndice 2.

Dominios	Descripción
Cerro Domuyo ppd.	Compuesto por un cuerpo ígneo central que integra la facies intrusiva del “Complejo volcánico Domuyo”. Cerro con forma elongada en sentido nortesur, con edades de $1,8 \pm 0,1$ Ma y $2,5 \pm 0,5$ Ma (Miranda, 1996). De carácter cuadrangular en sus límites y con exposición del basamento en su núcleo. Respondería a la reactivación de estructuras previas, evidenciado por un fuerte patrón de fracturamiento en su mitad occidental (zona de estudio), mientras que en el oriental parece comportarse como una unidad sin mayor deformación interna (Mariot, 2008).
Planicie Occidental	Topografía relativamente plana, con leve inclinación al O-SO. Ubicada entre el Río Varvarco al O y el A° Manchana Covunco y C° Domo y Covunco al E. Según JICA, 1984, este bloque se encuentra fuertemente fracturado y fallado por fallas directas de rumbo N y E, con rechazos entre 50 y 200 metros, de manera que un basamento de paleorelieve suave labrado sobre el basamento ígneometamórfico y las secuencias de sinrift asociadas, se hunde hacia el oeste y sur en forma escalonada. JICA (1984) describen un fuerte patrón de fracturamiento de orientaciones E, N, NE, NNE y NO al que se hallan relacionadas todas las fuentes termales del área. Se interpreta como una fosa de pequeñas dimensiones recurrentemente activada desde el Mioceno, con un patrón de deformación localizado.
Flanco Noroccidental	Ubicado entre A° Manchana Covunco, Penitentes, del Yeso y Turbio. Compuesto por: <u>Falla Punta negra</u> : Inversa de alto ángulo, no emergente, de vergencia oriental. Desaparece hacia el sur. Tiene asociados corrimientos epidérmicos. Algunos interpretan la continuación de la falla por debajo de falla Manchana Covunco. Inmediatamente al este, se ubica el braquisinclinal Punta negra de orientación NNE, pliegue que involucra toda la secuencia mesozoica, y cuyo flanco este es afectado por la falla Punta Negra. <u>Corrimiento Quebrada del Yeso</u> : de menor magnitud, que afecta a estratos mesozoicos ya plegados.
Flanco Sudoccidental	Desde arroyo Penitentes hacia el sur, hasta arroyo Manchana Covunco. <u>Falla Manchana Covunco</u> : Falla inversa de alto ángulo, rumbo meridiano y vergencia occidental. Afecta al basamento y pliega estratos mesozoicos. Emergente en algunas zonas. Reactivada en tiempos posteriores al Pleistoceno superior, ya que fallas menores asociadas a la misma afectan coladas dómicas riolíticas del Cerro Domo (0,55 a 0,02 Ma). <u>Sistema de fallas La Bramadora</u> : lineamientos paralelos de orientación E. Describe repetidos escalones topográficos de paredes verticales de varios metros de altura. Ubicadas entre arroyo Penitentes y arroyo Negro. <u>Falla Penitentes</u> : de orientación E.. Divide dos sectores con diferentes comportamientos morfológicos y estructurales. El dominio estructural hacia el

	norte se comporta como un bloque único limitado al oeste por la falla Punta Negra. Al sur se presenta la falla con vergencia occidental Manchana Covunco, con su bloque colgante asociado fuertemente fracturado. La falla sería vertical, con su labio elevado al norte, posiblemente con desplazamiento de rumbo dextral no comprobado. Edad de actividad máxima Mioceno tardío (Mariot, 2008)
Contrafuerte Occidental	Bloque de basamento sobreelevado que domina la estructura centro-occidental del cerro, el cual se comporta como un anticlinal de limbo oriental subhorizontal y occidental empinado. Con comportamiento distinto al norte y sur de falla Penitentes. Al norte su basamento se comporta como bloque único sin grandes fracturamientos, al sur el bloque gana curvatura por medio de sistema de fracturas paralelas del sistema La Bramadora.
	Falla Turbio: falla inversa de alto ángulo, emergente, rumbo NNE, vergencia oriental, que se ramifica a superficie en corrimientos y retrocorrimientos. Se asocia una edad menor al Mioceno tardío (Mariot, 2008).

Tabla 13. Dominios estructurales de la zona de estudio (Mariot, 2008)

Estratigrafía de la zona de estudio

Periodo	Ambiente y depósitos asociados
Holoceno	Se asocian depósitos aluviales, coluviales, glaciarios y de remoción en masa.
Volcánicas Plio-Pleistoceno	Se asocian cuerpos ígneos que integran el denominado “ Complejo volcánico Domuyo ”, unidad compuesta por una FACIES INTRUSIVA correspondientes al cuerpo ígneo central del cerro con forma elongada en sentido norte-sur, de edad con edades de $1,8 \pm 0,1$ Ma y $2,5 \pm 0,5$ Ma (Miranda, 1996) y bajo la denominación de Fm Domuyo; y varias FASES DE CARÁCTER EXTRUSIVO, tobas, brechas y lavas, y cuerpos riolíticos y andesíticos. Estos últimos se asocian a posibles cuerpos dómicos asociados al centro efusivo Domuyo (Cerro Domo, Cerro Covunco, Cerro Las Papas, Cerro Penitentes). Según algunos autores, todos estos productos estarían genéticamente relacionados a un mismo sistema magmático, siendo las coladas riolíticas los productos más diferenciados de un mismo magma diferenciado por cristalización fraccionada, e integrarían la fase efusiva del “ <i>Complejo Volcánico Domuyo</i> ” y las <i>Formaciones “Manchana Covunco”</i> (Pleistoceno Medio) y “ <i>Riolita Cerro Domo</i> ” (Cuaternario 0.55 a 0.02 Ma). La mayoría de estos cuerpos se habrían inyectado hacia superficie aprovechando los sistemas de fracturas existentes (Brousse y Pesce, 1982).
Volcánica Mioceno	Durante la orogenia andina, las secuencias sedimentarias de la cuenca Neuquina han sido involucradas en la deformación por inversión tectónica de las estructuras de rift que le dieron origen. Se han reconocido distintas intercalaciones volcánicas entre los depósitos continentales sinorogénicos del <u>Cretácico tardío y Terciario</u> (Ramos, 1998), que evidencian la intensa actividad magmática andina (Zapata et al., 1999). Aquí se registran la <i>Fm. Charilehue</i> , <i>Fm. Cajón Negro</i> y <i>Fm. Quebrada Honda</i> .
Sedimentitas J-K	La cuenca se comportó durante el <u>Jurásico temprano y Cretácico temprano</u> como una cuenca de retroarco (Ramos, 1989) estando afectada por episodios de inundación marina con fuerte influencia eustática global, procedentes desde el océano Pacífico, y episodios de desecación donde la conexión con el mismo fue muy restringida o directamente interrumpida. La conexión con el Pacífico habría sido a través de vías marinas desarrolladas entre islas volcánicas de un

	incipiente arco magmático en formación (Legarreta, 2002). Las unidades desarrolladas durante este período, corresponden a los depósitos de sin-rift de un conjunto de depocentros aislados limitados por fallas normales de basamento. El relleno de estos depocentros con geometría de hemigrábenes, claramente cuneiforme y de espesores variables (de pocos metros hasta 1.000 o 2.000 metros). Consisten en rocas clásticas continentales fuertemente asociadas a rocas volcánicas y piroclásticas. Aquí se registran la <i>Fm. Los Molles</i> , <i>Fm. Auquilco</i> , <i>Fm. Tordillo</i> y <i>Fm. Vaca Muerta</i> .
Basamento	La cuenca Neuquina se inicia como una serie de fosas de tipo rift interconectadas, que en el transcurso del <u>Triásico Tardío y Jurásico</u> fueron siendo paulatinamente reemplazadas por una cuenca única, extensa y continua, elongada en sentido norte-sur (Legarreta y Uliana, 1999). Durante ese período dominaron procesos de subsidencia regional regulada por enfriamiento y contracción térmica, junto a un aumento del nivel eustático que determinaron un incremento en la influencia marina sobre la sedimentación. En este período de la cuenca se depositó la <i>Fm. Guaraco Norte</i> y se hizo presente el <i>Complejo volcánico-plutónico Huingancó</i> , el cual consiste en granodioritas y microgranitos.

Tabla 14. Estratigrafía de la zona de estudio.

8.1.5. Análisis de teledetección

Para el procesamiento de imágenes satelitales, se utilizaron las siguientes imágenes:

- Imagen Satelital LANDSAT-8 OLI, adquirida el 23 de marzo del 2014 a las 14:30 hs, es decir con el sol vertical levemente inclinado hacia el E, con una calidad de 9 y una nubosidad menor al 1%. Obtenida de la página GLOVIS (<http://glovis.usgs.gov/>)
- DEM de resolución de 30 metros, obtenido de la página GDEM de (<http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>)
- Mosaico de trabajo elaborado a partir de imágenes satelitales obtenidas del Google Earth

8.1.5.1. Análisis geológico-estructural

Para este análisis se utilizó el DEM indicado en las metodologías, de resolución de 30 metros e imagen Landsat 8.

Inicialmente se identificaron en las imágenes las estructuras previamente definidas por diversos autores. Luego se resaltaron lineamientos nuevos, inferidos mediante el procesamiento de imágenes. Las combinaciones realizadas fueron integradas con el Modelo de Elevación digital, a fin de resaltar cambios topográficos importantes. Para ello, además de aplicar la herramienta de “hillshade”, se realizó un “mapa de contornos” con curvas de niveles asociadas.

Mediante este análisis se obtuvo:

- ✓ Carta temática de “Rasgos topográficos y estructurales”, elaborada con una imagen TIN y un mapa de contornos obtenidos a partir del DEM. Los

lineamientos inferidos se trazaron utilizando combinaciones de bandas Landsat que resaltan dichos rasgos (7:5:2 y 7:5:3 (Marchionni & Tessone, 2009)) (ver Apéndice 4 y 5).

- ✓ Carta de análisis estructural, en la que se identificaron patrones de orientación de las estructuras inferidas. En ella se identificaron familias de orientación NE, NO, E y N (ver Apéndice 6).

8.1.5.2. Delimitación de alteración hidrotermal

Para la delimitación de zonas con alteraciones hidrotermales, se siguió la secuencia de trabajo indicada en el segmento de metodologías mediante la combinación de bandas indicadas que resaltan dichos rasgos 5:6:7 y 5:6:3. La primera resalta las zonas de alteración hidrotermal en verde y azul y la segunda en los tonos verdes oscuros (Mia and Fujimitsu, 2012) (Marchionni and Tessone, 2009).

Se llevó adelante un análisis comparativo con las zonas de interés previamente identificadas durante el análisis de anomalías termales. Entre las zonas que presentan alteración de tipo hidrotermal, se resaltaron solo aquellas zonas con alteración que coincidan con valores altos de temperaturas aparentes e índices de vegetación bajos.

Esto permitió obtener:

- ✓ Carta temática de “Alteraciones Hidrotermales B-5:6:3”. En ella se pudieron resaltar en amarillo zonas previas con alteración hidrotermal (Apéndice 10).
- ✓ Zonas identificables a simple vista con las siguientes características:
 - Presencia de Alteraciones hidrotermales
 - Temperaturas mayores a los 30°C.
 - Índices de vegetación bajos.

8.1.5.3. Delimitación de anomalías térmicas

Para el cálculo de las temperaturas aparentes, se aplicaron las ecuaciones detalladas en el apartado de metodologías para la identificación de anomalías térmicas. Para estos cálculos se utilizaron las bandas térmicas 10 y 11 de Landsat 8.

En este caso, este análisis se complementó con un análisis de la cobertura vegetal de la zona, mediante el cálculo de “Índice de vegetación NDVI” con las bandas 4 y 5 (rojo e infrarrojo cercano). Para ello, en GIS se procede a la herramienta de Toolbox y luego a la opción de Map, Raster Calculation, en donde se realizan cálculos seleccionando las bandas térmicas con las que se desee trabajar. Se ingresa la siguiente fórmula de cálculo: “ $NDVI = (FLOAT(B5) - FLOAT(B4)) / (FLOAT(B5) + FLOAT(B4))$ ”

Finalmente, al igual que el tratamiento de los valores de temperaturas aparentes, se procede a categorizar los valores de NDVI en rangos, para lo cual se utilizará la herramienta Toolbox_Reclassify. Esto permitirá resaltar a simple vista las zonas con mayor y menor vegetación (procedimiento sugerido por José Rafael Marques da Silva).

El procesamiento de las imágenes satelitales y aplicación de cálculos asociados, permitió obtener:

- ✓ Carta temática de “Índices de Vegetación NDVI”. En esta se puede apreciar la distinción de cinco grados de vegetación de la zona (Apéndice 7).
- ✓ Carta temática de “Temperaturas Aparentes”. Tras la aplicación del cálculo de temperaturas aparentes, se definieron cinco rangos de temperaturas presentes (Apéndice 8).
- ✓ Carta temática de combinación de “Índices de Vegetación NDVI” y “Temperaturas Aparentes”. En esta se puede apreciar una combinación de los rangos de valores asociados a cada carta temática, la cual permite identificar con mayor precisión los sitios de interés (Tabla 15). Dado que los valores de temperaturas aparentes pueden estar afectados por la presencia de vegetación, se buscan aquellas zonas en las que los valores de temperaturas sean elevadas y los valores de vegetación bajos. De esta manera se resaltan en blanco como sitios de interés aquellas zonas con temperaturas superficiales mayores a los 30° e Índices de Vegetación de -0,10 a 0,05. Esta información se complementa con datos estructurales y de ubicación de fumarolas de la zona (Apéndice 9).

Clasificación		Valores	
		Carta de “Índices de Vegetación NDVI”	Carta temática de “Temperaturas Aparentes”
Clase 1		0,22 – 0,50	0,72 - 25
Clase 2		0,10 – 0,22	25 - 30
Clase 3		0,05 – 0,10	30 - 32
Clases de interés	Clase 4	0,01 – 0,05	32 - 35
	Clase 5	-0,10 – 0,01	35 - 39

Tabla 15. Rango de valores de temperaturas aparentes y índices de vegetación.

8.1.6. Integración de datos

Mediante la integración de datos recopilados de diversos autores y su comparación y análisis con el procesamiento de imágenes satelitales elaborado, se aborda finalmente a los siguientes resultados:

1. Existe un claro control estructural sobre la distribución de las temperaturas aparentes en el flanco occidental del Cerro Domuyo. Estas tienden a alinearse en dirección de las familias de estructuras de rumbo NO-SE y NS identificadas.
2. Es de interés destacar la presencia de domos de composición riolítica a dacítica identificados en la bibliografía recopilada y asociadas a las fases extrusivas del “Complejo Volcánico Domuyo”. En las imágenes satelitales se observan alineados con una tendencia NS y NE-SO, los cuales también se corresponden con las familias de estructuras identificadas.
3. Las temperaturas aparentes máximas obtenidas se ubican entre valores de 30° y 39°C. Hay que considerar que las temperaturas medias para la zona de estudio se ubican entre los 5° y 10°C, lo cual podría disminuir localmente los valores de temperaturas aparentes obtenidas.

4. En cuanto al análisis estructural, las orientaciones de las familias de estructuras inferidas tienen relación directa con la dirección de los grandes lineamientos ya identificados según la bibliografía. Se podría proponer como siguiente paso, discriminar dentro de las familias de estructuras identificadas, aquellas estructuras con escarpes de falla asociados; con el objetivo de comprobarlas en campo y buscar en ellas indicadores cinemáticos como estrías, que permitan reconstruir el sistema de esfuerzos presentes en la zona y confirmar su relación con los grandes lineamientos ya identificados. De esta manera se podría aportar de manera más precisa a los análisis estructurales existentes para una mejor interpretación del control estructural del sistema geotérmico.
5. Con respecto al análisis de alteraciones hidrotermales, mediante la combinación de bandas 5:6:3 y 5:6:7 para Landsat 8, se pudieron identificar zonas de interés según el rango de colores (, pero se resaltaron solo aquellos coincidentes con valores de temperaturas aparentes altos e índices de vegetación bajos. La combinación más efectiva fue la 5:6:3.
6. La combinación más efectiva para la identificación de rasgos estructurales consistió en la combinación de bandas 7:5:2 para Landsat 8.

8.1.7. Modelo geológico conceptual

Al analizar la secuencia estratigráfica presente en la zona, se podría determinar de manera aproximada cuales de las formaciones presentes en la secuencia podría trabajar como nivel de circulación o almacenamiento de fluidos, al igual que aquellas que podrían servir de niveles impermeables o sello para el reservorio. La secuencia de depósitos más interesante desde este punto de vista, podría ser aquella que se inicia en el neógeno (Mioceno), edad a partir de la cual, comienzan a depositarse intercalaciones volcánicas (lavas) intercaladas con materiales piroclásticos (tobas y aglomerados volcánicos). Estas secuencias, al combinarse posteriormente con los depósitos de la fase extrusiva del “Complejo Volcánico Domuyo”, compuesto por niveles de lavas riolíticas y dacíticas, podría servir de sistema geotérmico, debido a la presencia en conjunto, de niveles de lavas fracturadas intercalados con materiales piroclásticos finos con propiedades impermeables (ver Apéndice 11).

Los límites del sistema geotérmico, se podrían asociar a las estructuras presentes en la zona. La falla Penitentes ubicada al norte de la zona de estudio, podría servir como límite norte del sistema, desde la cual hacia el norte, no se han identificado en la bibliografía estudiada, manifestaciones hidrotermales. Lo mismo sucede hacia el sur, en donde se podría identificar como límite el Arroyo Covunco, sobre el cual se identifica la última manifestación hidrotermal. Este arroyo parecería estar controlado por un lineamiento de orientación EO. Hacia el Oeste, la zona asociada al Río Varvarco, ubicado sobre la falla Varvarco de rumbo N, podría considerarse como el límite oeste, y posible zona de descarga.

La zona de recarga, estaría asociada a las zonas altas del flanco occidental del cerro Domuyo, en donde el agua meteórica se infiltraría a favor de las estructuras allí

presentes y tomaría rumbo hacia el oeste, siguiendo las familias de lineamientos de rumbo EO y NO-SE, hacia la zona de descarga.

Con respecto a la fente de calor, podría estar asociada a la presencia del cuerpo ígneo central del cerro Domuyo, perteneciente a la fase intrusiva del “Complejo Volcánico Domuyo” y denominado Fm. Domuyo. Tiene una edad de $1,8 \pm 0,1$ Ma y $2,5 \pm 0,5$ Ma (Miranda, 1996), valores por debajo del límite planteado por OLADE para campos geotérmicos activos bajo la influencia de cuerpos intrusivos. También podría considerarse la presencia de una cámara magmática a niveles inferiores (ver Apéndices 12 y 13).

8.2 PERÚ

8.2.1 Ubicación Geográfica y características generales

El proyecto Ancocollo se encuentra ubicado al sur del Perú, en el departamento de Tacna, provincia de Candarave, presenta coordenadas geográficas $17^{\circ} 15' S - 70^{\circ} 5'$ Oeste, el Datum local en el que se trabaja es UTM - WGS 84, zona 19 Sur.

El traslado Lima - Tacna se realiza en avión (1h 50min) o bus (16h 26min), luego se accede por la vía asfaltada hasta Tarata ubicada a 91km (1h 50min), luego se accede por una vía sin afirmar a Candarave, capital provincial ubicada a 86km (1h 20min) (Ver apéndice 14). Ancocollo se encuentra en la Cordillera Occidental del Perú, dentro de la cadena de volcanes activos, cerca al volcán Yucamane considerado potencialmente activo (última erupción 1802) (Fig. 11).

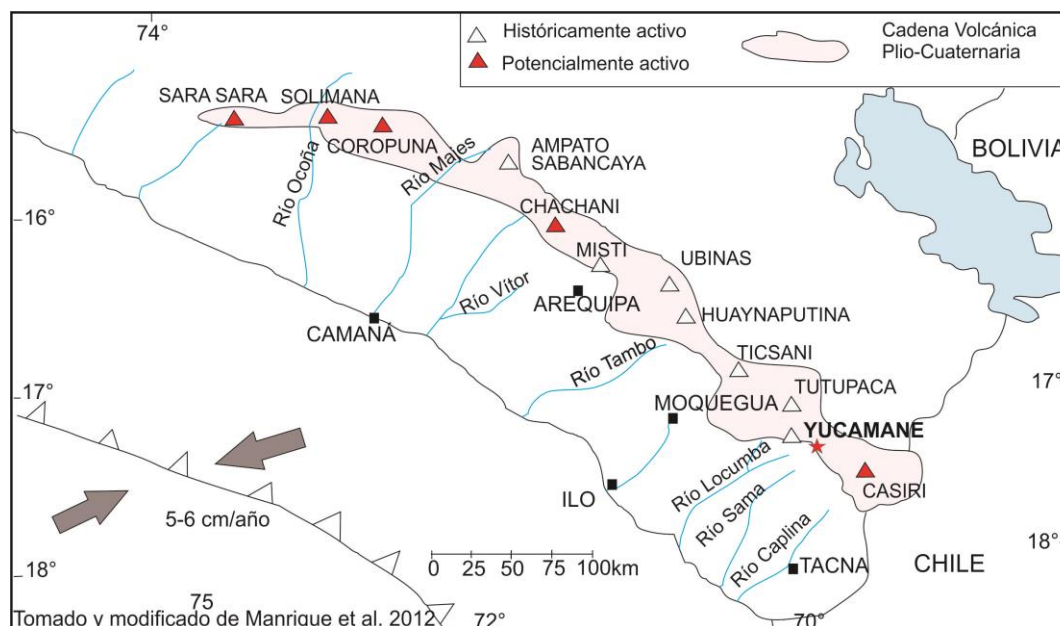


Fig.11 Cadena volcánica Plio-Cuaternaria en el sur del Perú, correspondiente a la zona volcánica central (Tomado y modificado de Manrique et al. 2010).

El área de estudio no se encuentra protegida como reserva natural y presenta las siguientes características (Tabla 16):

Características:	
Área de estudio	672 km ²
Altura mínima (msnm)	2800 (Laguna Aricota, Río Jaruma)
Altura máxima (msnm)	5000 – 5400 (Nevados de volcanes)
Altura de área de estudio (msnm)	4200
Según fuente: ANA – Autoridad Nacional del agua:	
Variación de Temperaturas	-10 a 14°C
Precipitación anual	440mm
Humedad relativa	76.8% (Enero) a 57.3%
Velocidad de viento	3.2 a 2.4 (Diciembre - Abril) / 1.8 a 1.2 (Febrero – Marzo)
Nivel de evaporación	184.8 a 110.2 mm (Noviembre a Julio)
Horas de sol	variaciones 13.2hr/día (Noviembre) a 10.5 hr/día (Febrero)

Tabla 16. Características geográficas e hidrológicas cerca de Ancocollo.

Respecto a la hidrografía los río Callazas, Calientes y Ancocollo recorren aguas abajo norte sur y en algunos tramos noroeste sureste hasta unirse al río Jaruma, que recorre de noreste a suroeste hasta llegar a la laguna Aricota (Ver apéndice 15) alimentando al río principal Locumba que desemboca en el Océano Pacífico, esta zona es conocida como la cuenca Locumba (Fig. 11). Las precipitaciones pluviales se incrementan en los meses de diciembre a marzo.

La vegetación a partir de los 3500 msnm está compuesta por pastos naturales e ichu que sirven de sustento para la ganadería, el árbol característico es el queñual.

En el aspecto social, Candarave presenta 8546 habitantes (Fuente: INEI), se halla dividida en seis distritos, veintisiete anexos, seis centros Poblados menores y trece comunidades campesinas. La principal actividad productiva es la agropecuaria, seguida por la pesquería, utilizando criadero de truchas en Laguna Aricota con venta local y regional. En menor cantidad se realizan actividades mineras metálicas y no metálicas (cerca de volcanes).

8.2.1 Antecedentes

En los años 70 se inician los estudios de geotermia en el Perú con el inventario de más de 200 fuentes termales en la Cordillera de los andes y valles Interandinos (1978) esto da lugar a la creación del primer mapa geotérmico del Perú (Cossio and Vargas, 1979), la cual divide el Perú en 6 zonas de interés geotérmico, localizando Ancocollo en el "Eje volcánico sur". En 1994 se inicia el Programa de Investigación geotérmica con el convenio entre las Instituciones del estado INGEMMET-Electroperú, donde se realiza el cartografiado geológico a los alrededores del volcán Yucamane, abarcando el río Ancocollo y se toman muestras en las 17 fuentes termales, obteniendo temperaturas en los manantiales de 35°C y 37.2°C (INGEMMET-Electroperú, 1994)

Cabe resalta que los estudios base son a partir de la elaboración de la Carta Geológica Nacional del Perú, donde se realiza el cartografiado a escala 1:100,000 (Jaén La Torre, 1965) y 1:50,000 (De la Cruz Bustamante and De la Cruz Matos, 2001), en el

cuadrángulo de Tarata 35-v, siendo esta última, un cartografiado con mayor detalle litológico asociando las rocas volcánicas del Plioceno y Cuaternario (Grupo Barroso) a un centro volcánico.

También se realizan estudios petrográficos y evaluación de amenaza volcánica a los alrededores del volcán Yucamane. Se determina que los magmas son calcoalcalinos altamente potásicos, de composición andesítica basáltica, andesita y dacita y respecto a la amenaza volcánica se informa que el peligro en caso de activación del volcán sería de caída de tefras flujos de barro y avalancha que afectarían a Candarave (Fidel Smoll and Huamaní Huaccán, 2001; Manrique et al., 2010; Morche and De la Cruz Bustamante, 1994; Rivera Porras and Mariño Salazar, 2004; Rivera Porras and Villacorta, 2004). Así mismo se continúan los estudios regionales determinan los dominios geotectónico en el Perú (Carlotto et al., 2009) en el cual se delimitan las características estratigráficas, estructurales y magmáticas, ubicando a el área de estudio en el dominio de la Cordillera Occidental limitando al oeste con el dominio Atico-Mollendo-Tacna y al este con el alto Condorama-Caylloma.

En el 2007, se inicia el acuerdo cooperativo con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), donde se realiza el muestreo de fuentes termales a nivel nacional según el mapa geotérmico del Perú con las instituciones del Estado y se realiza un informe final donde se tiene como resultado modelos geológicos conceptuales y cálculo de potencial de las diversas áreas de interés. En este informe, Ancocollo es seleccionada como “Campo geotérmico promisorio” con la capacidad de generar hasta 98.2 MWe (Potencial del recurso al 80%) (Agencia de cooperación internacional del Japón (JICA), 2012)

8.2.3 Marco Geológico Regional

El área de estudio se encuentra en la cadena volcánica Plio- Cuaternaria, originada por la subducción entre la placa continental sudamericana y la de Nazca, actualmente subduce a una velocidad de 5-6 cm/año (Fig. 11).

La cadena volcánica se encuentra en la Cordillera Occidental del sur del Perú, dentro de la cual durante el Jurásico inferior, debido a la formación del arco volcánico Chocolate (190-170Ma), se forma por procesos tectónicos distensivos una cuenca que inicia su ciclo de sedimentación con carbonatos, turbiditas y silicoclásticos hasta el Cretácico inferior (Carlotto et al., 2009).

Limita al oeste con el sistema de fallas Cincha Lluta Incapuquio (Ver apéndice 16), la cual durante el Jurásico se caracteriza por ser de régimen extensivo formando fallas normales en la cuenca, posteriormente durante el Cretácico superior se inicia la inversión tectónica generando sistemas de régimen compresivo a manera de flor positiva (Acosta et al., 2010), las cuales sacan rocas Precambrianas y Paleozoicas. En la actualidad esta falla se caracteriza por ser transpresiva, de sistema sinistral transcurrente, con una longitud de 400 km y localmente el ancho abarca más de 10km. Actualmente se encuentra sísmicamente activa (Jacay et al., 2002). El dominio tectónico Cordillera Occidental se caracteriza por la intensa actividad volcánica desde

el cretácico superior (75 Ma, Arco volcánico Toquepala-Tantará) hasta la actualidad (Arco Frontal).

Los magmas de estos arcos son calcoalcalinos y las firmas de sus elementos traza son típicas de subducción, se observan variaciones con el tiempo de los elementos traza como Sm/Yb y Sr/Y (Mamani et al., 2010).

El dominio Atico Mollendo Tacna presenta rocas Precambrianas y Mesozoicas con direcciones aproximadas N-S, en forma oblicua a este sistema de fallas. Posteriormente los afloramientos fueron cubiertos por depósitos volcánicos durante el Cenozoico.

El dominio Alto Condoroma Caylloma corresponde a un alto estructural Mesozoico desarrollado en la parte media de la cuenca occidental del sur y centro del Perú. Es controlada por sistemas de fallas NO-SE. Durante el Mesozoico actuaron como fallas normales y durante el Cenozoico como inversas (Carlotto et al., 2009).

8.2.4 Marco Geológico Local

El marco geológico local se realizó en base a los mapas geológicos a escala 1:100,000 y 1:50:000 publicados por INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico; 1998, 2000) en la web institucional y en base al convenio de INGEMMET – ElectroPerú estudio de Programa Geotérmico.

El área de estudio se caracteriza por presentar en el basamento rocas sedimentarias marinas depositadas durante el Jurásico – Cretácico, sobreyacen rocas volcánicas piroclásticas intercaladas con lavas andesíticas durante el Cretácico superior – Plioceno y rocas volcánicas lávicas de composición basáltica a riolítica durante el Plioceno al Holoceno, a este grupo se les nombra como grupo Barroso. El grupo Barroso fue diferenciado litológicamente para asociarlo a una fuentes de emisión (De la Cruz Bustamante and De la Cruz Matos, 2001).

Estratigrafía:

Se identificaron secuencias del Jurásico superior conformadas por rocas tabulares de lutitas gris oscuras intercaladas con areniscas y cuarzo areniscas, estas secuencias reciben el nombre de Formación Labra correspondientes al grupo Yura (Js-la). Sobreyacen rocas tabulares de areniscas detríticas, cuarcitas blancas intercaladas con limolitas y limoarcillitas gris a gris oscura reconocida como Formación Hualhuani (Ki-hu) (Ver apéndice 4.).

Posteriormente se encuentran tobas cristalolíticas brechadas y silicificadas, predominan fragmentos en su matriz se emplazaron durante el cretácico superior – Paleoceno y se les reconoce con el nombre de grupo Toquepala, formación Quellaveco (KsP-sa/tb). La actividad explosiva continúa durante el Paleoceno donde se emplazan flujos piroclásticos de bloques y clastos volcánicos rodeados de una matriz de ceniza deleznable, acompañado de niveles de flujos de lava andesíticos (Formación Tarata, P-ta_i). Así mismo sobreyacen flujos piroclásticos de bloques y clastos andesíticos (Formación Huilacollo, Nm-hl) estas rocas volcánicas conforman el grupo Tacaza.

Luego, se emplazan flujos piroclásticos de bloques y clastos, tobas riolíticas y riolíticas rosáceas soldadas, intercaladas con andesitas porfíricas depositadas durante el Mioceno, estas características corresponden a la formación Huaylillas (Nm-hu). Sobreyacen secuencias volcánicas piroclásticas de ceniza y yeso durante el Plioceno reconocidas como Formación Capillune (N-ca).

Durante el Plioceno al holoceno se desarrolló una actividad más efusiva que la anterior conocida anteriormente como grupo Barroso (Jaén La Torre, 1965) y posteriormente subdividida mediante la estratigrafía volcánica (De la Cruz Bustamante and De la Cruz Matos, 2001). En el área de estudio se han reconocido depósitos volcánicos asociados a 9 centros de emisión (Cumaile Yanacachi, Poliailla, Cayco, Nazaparco Ichurasi, López Extraña Ichurasi, Yucamane-Yucamane chico, Inciensocucho, Jaruma, Nazaparco Yucamane) durante el Plioceno y 3 (Yucamane-Yucamane Chico, Inciesocucho, Nazaparco Yucamane) durante el Holoceno.

Las características petrográficas se detallan a continuación de acuerdo a la nomenclatura en el mapa geológico de Ancocollo (Ver apéndice 17).

/aa (Andesítica afírica): se encuentra en forma de flujos compuesto de una roca de color gris oscura de grano fino algo porosa, referente a los centros volcánicos Jaruma y Yucamane - Yucamane Chico.

/ab (Andesita basáltica): Abundante plagioclasa y máficos en cristales pequeños en la matriz, se encuentran en el flanco Noroeste del centro volcánico de Lopez Extraña y flujos grisáceos oscuros entre el volcán Yucamane y el cerro Calientes.

/ap (Andesita porfírica): Esta característica lo presentan la mayoría de depósitos durante el Plioceno como Jaruma y Nazaparco Ichurasi que se presentan en forma de lajas, con cristales de plagioclasa, las andesitas resultan las más antiguas según dataciones radiométricas en 6.23 ± 1 Ma (Ingemmet & Electroperú, 1994; Kaneoka – Guevara, 1989) y de 5.6 ± 0.3 Ma (Ingemmet, 2000). Las andesitas de López extraña presentan matriz criptocristalina. Las del centro volcánico Yucamane –Yucamane chico presentan plagioclasas medianas a gruesas con biotita en matriz afanítica. En Inciensocucho se presentan argilizadas y bien intemperizadas. Las que corresponden a Cumaile Yanacachi presenta plagioclasa y mica cloritizada la última efusión según dataciones radiométricas corresponde a 0.38 ± 0.3 Ma (Ingemmet & Electroperú, 1994).

/as (Andesita porfírica seriada): Presenta cristales de plagioclasa de tamaño gradado (creciente o decreciente), se encuentran al sur de la laguna de Vilacota (Lopez Extraña Ichurasi).

/cl (cuarzo latita en lajas): flujo masivo con disyunción en lajas, compuesto de cuarzo, ortoza, plagioclasa, y hornblenda corresponden al centro volcánico Nazaparco Ichurasi.

/dp (Dacita porfírica): Estas características las presentan los centros volcánicos del Plioceno y del Holoceno Yucamane -Yucamane chico. Los flujos de lava están bien

soldadas, conteniendo pocos líticos volcánicos, muestra cierta fluidez que le da el aspecto de estratos en forma de lajas.

/pa (piroclasto de arena pómez y líticos): Presenta estas características el centro volcánico Yucamane – Yucamane chico durante el Holoceno.

/pi (Piroclastos): Emisiones volcánicas de alta energía corresponden a los centros volcánicos durante el Plioceno (Nazaparco Ichurasi) y Holoceno (Yucamane-Yucamane chico), consta de piroclastos de ceniza deleznable, contiene flujo de tobas líticas y de pómez. Las lavas de Inciensocucho reportan edades radiométrica de 0.9 Ma.

/rdp (Riodacita porfírica): En el centro volcánico Pollailla se encuentra generalizado a cuerpos o flujos vesiculares y fluidales, constituido por cuarzo, plagioclasa, máficos. También se encuentra en Jaruma.

/rp (Riolita porfírica): El centro volcánico de Lopez Extraña está constituido de una roca con plagioclasa, cuarzo, biotita, poco anfíbol, en la matriz también se encuentra ortosa, máficos, plagioclasa y cuarzo. En el centro volcánico de Inciensocucho está compuesto por un flujo volcánico grisáceo con plagioclasa y cuarzo relleno de cavidades. Estas características también las presenta Nazaparco Yucamane durante el Plioceno y Cuaternario.

/tba (toba andesítica): Ubicado al este del cerro Yucamane chico, constituido por flujo masivo compacto con bloques y clastos bien dispersos de grano grueso de color gris blanquesino.

/tbd (Toba riodacita): Estas características se presentan durante el cuaternario para los centros volcánicos Yucamane-Yucamane chico y Nazaparco Yucamane. flujo piroclástico, pobremente clasificado y debilmente compactado constituido por bloques, clastos y granos en escasa matriz cenizosa, presenta cristales de plagioclasa, vidrio y biotitas. Las dataciones radiométricas registran edades de 0.97+ 0.04 y 0.54+ 0.17 Ma.

/tbka (Toba litocristalina): El centro Lopez Extraña Ichurasi presenta depósitos de color rosado, masivo, con cristales de plagioclasa, vidrio y líticos subangulosos, moderadamente soldados (Laguna Vilacota).

/tcr (Toba de cristales): Roca piroclástica con plagioclasa, fragmentos líticos, máficos, cuarzo, etc., en matriz microgranular corresponden a Nazaparco Ichurasi.

/tqap (Traquiandesítica porfírica): Emitidas durante el cuaternario por los centros volcánicos Yucamane Yucamane chico y Nazaparco Yucamane, la mineralogía consta de plagioclasa, hornblenda y biotita, flujo con clastos dispersos de aspecto fluidal. Inciensocucho también presenta estas características.

Roca intrusiva:

Diorita (N-di)

Afloran en pocas dimensiones al oeste de Ancocollo, corta las secuencias del Grupo Tacaza. Son rocas frescas de grano medio a fino de color gris a gris oscuro conteniendo cuarzo menor a 15%, se considera de edad Paleógena.

Depósitos del Cuaternario – Pleistoceno (Q-fg, Qpl-mo, Qh-e, Qh-co, qh-bo, Qh-al)

Están constituidos por depósitos de origen glacial, transporte acuoso, degradación de rocas in situ (paleosuelos), pantanos como depósitos fluvio-glaciares, aluviales y morrénicos.

Geología estructural:

Los ejes anticlinales y sinclinales localizados en rocas sedimentarias presentan un eje noroeste sureste al igual que el rumbo de sus capas. Presenta dos controles estructurales E7 entre Yucamane y Lopez Extraña con direcciones predominantes norte sur y la estación E8 ubicada cerca al punto de proyecto Ancocollo presenta rumbo predominante NNO-SSE.

Manifestaciones termales

Al norte de Yucamane chico y al noreste de Lopez Extraña se encuentran fuentes termales y afloramientos de sínter, pozos de lodo y azufreras abandonadas señalizadas en el mapa en color rojo.

8.2.5 Análisis de teledetección

Se realizaron los análisis usando imágenes satelitales como Landsat 8 imagen adquirida el 16-08-2013 a las 14:43:39, azimuth del sol 45.79, cobertura de nubes 0.38 y la imagen satelital Aster cuenta con las características de ser tomada el 11-01-2001 horas 05:03:27, se encuentra cubierto por nubosidad al noroeste de la imagen. En estos dos tipos de imágenes se realizaron diversas combinaciones de bandas para resaltar litología, estructuras, alteraciones hidrotermales y zonas de temperatura aparente, así mismo, se complementó esta información con el uso de imágenes DEM y google earth. Donde se obtuvieron los siguientes resultados:

8.2.5.1 Análisis geológico – estructural

En este caso se usaron las imágenes satelitales para resaltar rasgos litológicos y estructurales, las mejores fueron con el uso de imágenes landsat 8 con las combinaciones de bandas 753 y 653 (Ver apéndice 18), imágenes Aster 931 y 831. También se usaron los efectos de sombras (hillshade) y las imágenes del google earth.

Con lo que se interpreta que el área de estudio se encuentra delimitada por un lineamiento marcado NE-SO, dividiendo Yucamane con Lopez Extraña, en ciertos tramos se ubican zonas de escarpa en el lado oeste del lineamiento.

En el caso de la zona oeste (Yucamane) se ubicaron los conos volcánicos poligenéticos se observa que los conos destruidos y conservados se encuentran orientados noroeste sureste, ubicándose el cono destruido al sureste. La dirección de la zona de colapso de la caldera volcánica Yucamane Chico se encuentra orientada al sureste. Así mismo predominan zonas de escarpa con orientaciones noroeste-sureste con hundimiento en el suroeste, también se observa un escarpe con rumbo noreste suroeste orientado al noroeste, delimitando Yucamane Chico del Yucamane. Existe otra zona de escarpe de largo recorrido al oeste de esta zona con rumbo noroeste sureste, con zonas hundidas en el terreno al noreste.

En el sector Este los conos poligenéticos se encuentran orientados NO-SE, similar a las orientaciones de las escarpes al norte y sur de Yucamane. La dirección de la zona de colapso del cono de Lopez Extraña es con dirección al sur. También se ubicaron probables zonas monogenéticas con orientaciones noroeste sureste y noreste sureste. Existen escarpes con rumbo noreste suroeste y presentan bloque hundido al noroeste. Otras con rumbo noroeste sureste y orientado al suroeste.

Existe un lineamiento marcado con dirección norte sur partiendo de Lopez Extraña y atravesando la quebrada Ancocollo.

8.2.5.2 Delimitación de alteración hidrotermal

Para este análisis se analizaron las imágenes landsat 8 y aster, esta última sólo se tenía el borde este del área de estudio, por lo cual se decidió emplear las dos (ver Apéndice 19). En la imagen Aster se usó las combinaciones de bandas 468, resaltando mejor las características de alteración hidrotermal o presencia de arcillas, estas bandas se encuentran ubicadas dentro del Infrarrojo de onda corta (SWIR) por lo que no se realizó la equivalencia en la imagen landsat 8, pero en esta última imagen se realizó la combinación de bandas 357, que también abarcan las dos bandas dentro del infrarrojo de onda corta y dentro del rango visible. Esta combinación en la imagen landsat 8 también resalta las características deseadas, pero no resalta sus límites como en la imagen Aster.

Las zonas de alteración hidrotermal caracterizadas usando imágenes Aster presentan tendencia en orientación hacia el NE-SE, se delimitaron los del área este por estar mejor resaltados en color rosado a púrpura.

8.2.5.3 Delimitación de anomalías térmicas.

En este caso, el resultado señala temperaturas de -4 a 40°C (ver Apéndice 20), en un terreno promedio de 4000msnm, llegando a temperaturas mínimas de -10°C y máximas de 14°C.

Se consideraron temperaturas aparentes mayores a 20°C que fueron contrastadas con el mapa de índice de vegetación. No se tomaron en cuenta las áreas que se superponen con extensa vegetación, en este caso por la presencia de bofedales. Se

subdividieron en tres rangos de categoría de temperatura aparente: 20–25°, 25-30° y 30-40°.

Luego del contraste con el mapa de índice de vegetación (ver Apéndice 21) se concluye que las temperaturas entre 30 y 40° presentan ligeras orientaciones noroeste sureste. Las temperaturas entre 25 y 30° presentan mayor área de expansión, y preferencia por el lineamiento norte sur proveniente de Lopez Extraña. Las áreas de 20 – 25 ° además de mantenerse cerca de los centros volcánicos presentan orientaciones similares a las zonas de escarpe.

8.2.6 Integración de Datos.

Al integrar todos los datos (ver Apéndice 22) se interpreta que el lineamiento al este del volcán Yucamane representa un cambio en el comportamiento estructural, por lo que se sugiere la reducción del área de análisis para la interpretación (ver Apéndice 23). Según el sistema de colapso de cono en Lopez Extraña, las escarpes con orientación NE-SO y el lineamiento marcado aproximadamente norte sur se puede interpretar que el área cerca de Ancocollo se encuentra afectado por un esfuerzo máximo NNE-SSO, el lineamiento prolongado NNO-SSE podría representar el eje de cizalla o fracturamiento ocasionado por los esfuerzos lo que ayudaría a que los fluidos puedan transitar con mayor facilidad por esta zona ocurriendo zonas de manifestaciones termales en el proyecto Ancocollo, o en todo caso permitir que los fluidos que provienen de la dirección noreste al llegar a la intersección con este lineamiento puedan usar esta vía.

De acuerdo a la estratigrafía volcánica se tiene que el volcán Lopez Extraña presenta tobas litocristalinas a la base, periodos de emisión de lavas de andesitas basáltica, andesita, andesita porfírica, riolita y traquiandesita evidenciando evolución magmática y además registra su última actividad volcánica durante el Plioceno (aprox. 5 a 3Ma). Ancocollo se encuentra sobre la emisión de productos volcánicos que proviene del volcán Inciensocucho que registra actividad durante el Cuaternario, con dataciones radiométricas de hasta 0.9 Ma. La litología consiste en lavas andesita a la base, piroclastos y lavas traquiandesitas. Según las interpretaciones evidencia afloramientos que cortan las secuencias volcánicas que podrían representar a domos.

Datos complementarios:

Geoquímica:

La química del agua es de origen meteórica, recibe una mínima contribución de agua magmática, las rocas reservorio corresponden a rocas sedimentarias marinas, la posible temperatura del reservorio varía entre 180 – 230°C (TNaKCa), el flujo geotérmico recorre en dirección norte sur (Agencia de cooperación internacional del Japón (JICA), 2012), (Apéndice 24).

Geofísica:

De acuerdo a los estudios geofísicos de magnetotelúrica revelan que las zonas de baja resistividad se encuentran en el flanco este de Ancocollo a una profundidad superficial

de 200 a 300m, se le considera como resultado de rocas argilizadas y que contienen considerable cantidad de esmectita y / o minerales inter-estratificados de arcilla, afectados por la actividad geotérmica (Agencia de cooperación internacional del Japón (JICA), 2012), (ver Apéndice 24).

8.2.7 Modelo geológico Conceptual

De acuerdo a los datos complementarios ayuda a tener más probabilidad de certeza en la teoría realizada durante integración de datos.

El modelo conceptual se elabora a partir del perfil geológico orientado SO-NE, vista al NO (ver Apéndice 14), con las letras A-A' (ver Apéndice 25), se puede analizar que debajo de las secuencias volcánicas de Inciensocucho se encontraría la formación Huailacollo y Tantará inferior, que corresponden a secuencias piroclásticas, se podría inferir que estas secuencias representan a la capa sello en profundidad, según los datos geofísicos evidencian una profundidad de 300m. Debajo de estas secuencias se encontraría la formación Hualhuani compuesta en su mayoría por rocas sedimentarias areniscas, siendo estas secuencias la probable roca reservorio (ver Apéndice 24).

En el estudio de imágenes satelitales se observa que el punto de Ancocollo resulta interesante para blanco de exploración, pero se puede sugerir otro punto interesante aguas arriba donde se marca en morado zonas con temperatura aparente mayor a 25°C. Los puntos de intersección de lineamientos NNO-SSE y los de NE-SO resultan interesantes por lo cual se recomienda en la etapa de campo priorizar la toma de datos estructurales transversales a los lineamientos orientados NE-SO y también los de NNO-SSE para poder controlar el campo de esfuerzos. Resulta conveniente tomar muestras para dataciones radiométricas en el volcán Lopez Extraña y tomar datos de los posibles domos que se analizaron con teledetección de imágenes satelitales. Respecto a las anomalías térmicas sería interesante tomar muestras y medir temperaturas superficiales de zonas de alteración hidrotermal aguas arriba de Ancocollo. Luego del estudio de campo se podría tener datos más precisos acerca de la fuente de calor pero se infiere puede encontrarse en Inciensocucho.

8.3 ECUADOR

8.3.1 Ubicación Geográfica y características generales

Ubicado dentro de la reserva Cotacachi-Cayapas al norte del Ecuador, Cuicocha (en el idioma indígena, tsuicocha) se encuentra en la provincia de Imbabura aproximadamente a 110 km al norte de Quito (capital del Ecuador) o 14 km al noroeste de Otavalo (ver Apéndice 26). La zona urbana más cercana al volcán Cuicocha se encuentra aproximadamente a 9 km al oriente (Cotacachi) y existen varios poblados en las zonas colindantes al complejo volcánico. El acceso es a través de vías de primer orden en las que se puede mencionar la vía que comunica Otavalo con Selva Alegre.

El relieve en el área es irregular, las cotas menores pueden llegar hasta los 1800 msnm en el valle y hasta los 4939 msnm en la cumbre del volcán Cotacachi y conjuntamente con el volcán Imbabura de 4621msnm; conforman los principales accidentes orográficos de la zona. El sistema hidrográfico en su mayor parte está

conformado por varios ríos entre los que se pueden destacar los ríos Apuela, Ambi, Asabí, Blanco y Cotacachi; varias quebradas confluyen hacia los ríos formando cuencas hidrográficas hacia el occidente y oriente del lago Cuicocha.

El clima es templado periódicamente húmedo a frío de alto andino y de tropical lluvioso a templado periódicamente seco, la precipitación media anual aproximada de 1700 mm/año (INAMHI 2011). Es uno de los destinos turísticos más visitados en el Ecuador debido al paisaje lagunar de páramo andino y a su flora y fauna multidiversa. La vegetación desarrollada sobre la lava volcánica, posee más de 400 especies, entre ellas se puede encontrar diez variedades de orquídeas.

El lago Cuicocha corresponde a un lago producto de un período eruptivo altamente explosivo que formó la caldera y posteriormente el lago. En su interior aloja dos islas (Yerovi y Wolf) separadas por un canal (Fig. 12):



Fig. 12. (a) Complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha, vista hacia el norte (Foto: P. Ramon IG-EPN). (b) Características del lago Cuicocha *(Gunkel et al., 2011)

8.3.2 Antecedentes

La Geotermia en el Ecuador dio inicio desde finales de la década de los 70's, donde la investigación para el aprovechamiento de este recurso estuvo a cargo de instituciones gubernamentales, que con el apoyo de entidades internacionales llevaron a cabo estudios de reconocimiento y prefactibilidad en algunas zonas prospectivas. A inicios de la década de los '90 la desaparición de estas instituciones ocasionó un cese momentáneo en la investigación geotérmica. Posteriormente estudios aislados ajenos a la geotermia se han realizado en Cuicocha y se presentan los principales, a continuación:

- ✓ Instituto Ecuatoriano de Electrificación – Organización Latinoamericana de Energía (INECEL – OLADE, 1980), en el “Estudio de Reconocimiento Geotérmico Nacional de la República del Ecuador” menciona a Cotacachi como una zona de interés que probablemente presenta una anomalía térmica enmascarada por el flujo de las aguas subterráneas frías.
- ✓ Ministerio de Energía y Minas (MEM, 1988): En el documento “La Geotermia en el Ecuador” identifica al área de Cuicocha-Chachimbiro como de primera

prioridad, debido a las buenas características vulcanológicas e hidrogeológicas para contener un reservorio geotérmico.

- ✓ von Hillebrandt, C. and Hall, M. L (1988): Elaboran un Mapa de los Peligros Volcánicos Potenciales Asociados con el Volcán Cuicocha. Esc.1:50 000. Estima al menos 5 km³ generados en la formación de la caldera.
- ✓ Organización Internacional de Energía Atómica, OIEA (1990): en su publicación “Estudios geotérmicos con técnicas isotópicas y geoquímicas en America Latina” dan a conocer que las vertientes termales en el área de Cuicocha provienen de diferentes reservorios. No se muestran datos de ubicación de las vertientes muestreadas.
- ✓ Almeida E. (1992): Vertientes bicarbonatadas distales muestran un shift positivo del 18O y puede ser relacionado a un sistema hidrotermal bajo la caldera de Cuicocha.
- ✓ Gunkel et al. (2008-2011): En una serie de publicaciones estudian el complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha (haciendo énfasis en este último), sus depósitos y evidencias de actividad volcánica (gases, vertientes termales y frías) con un enfoque limnológico y vulcanológico.
- ✓ Padrón et al., (2008): Publican un estudio de gases difusos realizado en Cuicocha.
- ✓ Inguaggiato S. et al. (2010): En su publicación sugiere un origen profundo para los fluidos en Cuicocha.
- ✓ Pidgen A. (2014): Elabora una reconstrucción de las fases explosivas del volcán Cuicocha.

8.3.3 Marco Geológico Regional

Contexto Geodinámico

Ecuador se encuentra en el denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, caracterizado por movimientos telúricos y actividad volcánica intensa. De Este a Oeste se distinguen 4 regiones: Oriente, Sierra, Costa y región Insular; cada una de ellas con características geomorfológicas particulares (Fig. 13).

[Cuenca de Ante país] El Oriente se desarrolla entre la cuenca de Putumayo en Colombia y la cuenca de Marañón en Perú, contiene formaciones sedimentarias paleozoicas a cuaternarias, depositadas sobre un basamento cratónico Precámbrico (Tshopp, 1953). El límite occidental de la cuenca lo conforma la zona sub-andina, geomorfológicamente está caracterizada por los levantamientos Napo, al NO y Cutucú, al SO, separados por el mega-cono aluvial del Pastaza.

[Arco volcánico] La Sierra se encuentra atravesada por la cordillera de los Andes, que en el Ecuador se subdivide en: a) La Cordillera Real conformada por rocas metamórficas paleozoicas distribuidas en terrenos de naturaleza alóctona y autóctona, orientados NNE, separados por grandes sistemas de fallas regionales que representarían suturas de acreción (Aspden and Litherland, 1992; Litherland et al., 1994). b) La Cordillera Occidental comprende bloques aloctonos y autóctonos acrecionados a la margen continental durante el Cretácico tardío y el Terciario. Consiste de rocas volcánicas básicas del Cretácico tardío con afinidades de plateau oceánico (Vallejo, 2007), depósitos volcanoclásticos y secuencias turbidíticas del

Mesozoico tardío al Cenozoico temprano. c) Entre 1°N-2°S el valle interandino separa la Cordillera Occidental de la Real y se desarrolla un arco volcánico calco-alcalino que se extiende hasta Colombia (Barberi et al., 1988; Hall, M.L and Beate, 1991) y rellena con productos volcánicos Neógeno-Cuaternario al valle interandino (Hungerbühler et al., 2002; Lavenu et al., 1996) . A partir de 2°S - 5°S el bien definido valle interandino se desvanece (Jaillard et al., 2008).

[Ante arco] La Costa corresponde a una planicie costera conformada por terrenos de origen oceánico acrecionados a la margen continental entre el Cretácico y el Eoceno tardío (Feininger and Bristow, 1980; Goossens and Rose, 1973), cubierta por depósitos más recientes.

La región Insular representada por las islas Galapagos, conforma un sistema de 13 islas principales y decenas de islas pequeñas, a 1000 km al W del Ecuador continental. Su formación es por la actividad del punto caliente del mismo nombre, cuya erosión ha pulido la cordillera submarina de Carnegie y su interacción con la placa suramericana es responsable del arco volcánico cuaternario que se ha formado en el Ecuador continental.

El arco volcánico cuaternario está caracterizado por aproximadamente 60 volcanes (Hall, M.L and Beate, 1991), de los cuales varios son activos o potencialmente activos y tomando en cuenta la actividad volcánica que acaece en las islas Galápagos, el potencial Geotérmico teórico en el Ecuador es de 6500 MWe (Stefansson, 2005) y considerando grandes calderas riolíticas (Chacana, Chalupas) podrían incrementar el potencial teórico a 8000 MWe (MEER, 2010).

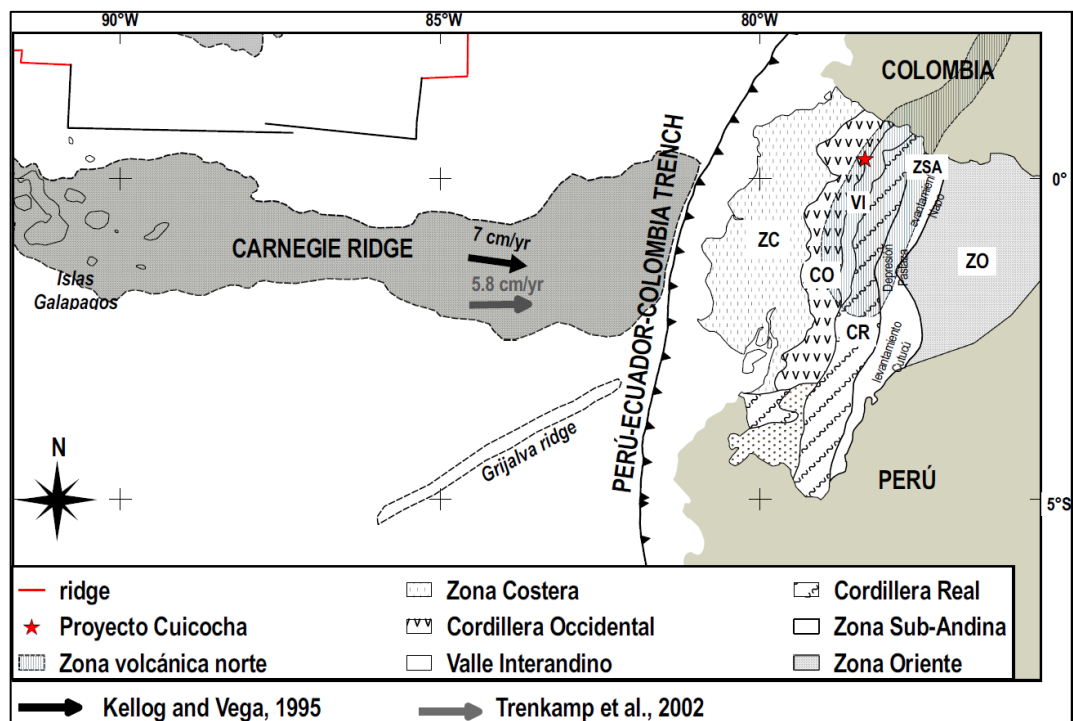


Fig. 13. Contexto geodinámico en Ecuador (adaptado de (Aspden and Litherland, 1992; Litherland et al., 1994; Spikings et al., 2001; Thorpe, 1984)).

Geología Regional

Cuicocha se emplaza en la estribación oriental de la Cordillera Occidental cuyo basamento comprende rocas volcánicas máficas y ultramáficas del cretácico tardío (Formación Pallatanga y Unidad San Juan), perteneciente al bloque oceánico alóctono Pallatanga, acrecionado a la margen continental durante el Cretácico tardío al Eoceno (Feininger and Bristow, 1980; Goossens and Rose, 1973; Hughes and Pilatasig, 2002; Jaillard et al., 2004; Pratt et al., 2005; Spikings et al., 2005; Vallejo, 2007), limitado al oeste por la zona de falla Chimbo-Toachi y al este por el sistema de fallas Calacalí-Pujilí-Pallatanga (Hughes and Pilatasig, 2002). El Bloque Pallatanga comprende una serie de rocas volcánicas y sedimentarias; en el área de estudio estas rocas se encuentran en contacto tectónico por una secuencia cretácica superior de rocas volcánicas y sedimentarias del grupo Río Cala (Fm. La Portada, Fm. Mulaute, Fm. Pilatón, Fm. Natividad y Fm. Río Cala); depositadas en un ambiente de arco de isla intra-oceánico, y Fm. Silante, esta última interpretada como un arco volcánico continental (Vallejo, 2007). La intrusión del gran Batolito de Apuela de tipo I de edad Miocénica y la actividad volcánica intermedia a ácida del Mio-Plioceno cubren, en cierta medida, a las rocas más antiguas de la Cordillera Occidental (Fig. 14). A continuación se describe la secuencia litológica que presenta el área de investigación de la más antigua a la más joven (ver Apéndice 27); principalmente en base al trabajo elaborado por BGS-CODIGEM (2000) en el mapeo de la Cordillera Occidental (0° - 1°N) y el trabajo de doctorado elaborado por Vallejo Cristian (2007), entre otros autores. Los espesores en la mayoría de formaciones no son indicados debido a la complejidad en la tectónica durante la evolución de la Cordillera Occidental.

Formación Pallatanga [KPa]

Aflora a través de la vía Otavallo – Selva Alegre, limitado al este con el Valle Interandino por el sistema de fallas Calacalí-Pujilí-Pallatanga. Comprende una secuencia de rocas máficas y ultramáficas con afinidades geoquímicas de plateau oceánico (McCourt et al., 1997). La formación consiste de basaltos, microgabros, diabasa, peridotitas, pillow lavas, doleritas masivas no vesiculares y hyaloclastitas muy alteradas y datadas del cretácico tardío (87 – 84 Ma).

GRUPO RIO CALA [GRC]

Definido por Vallejo (2007) como una secuencia de depósitos volcánicos y sedimentarios depositados durante el cretácico tardío en un ambiente de arco de isla intraoceánico sobre la Fm. Pallatanga. Las unidades que comprende son La Portada, Mulaute, Pilatón, Natividad y Río Cala, pero se describen únicamente las que involucran el área de estudio:

Formación La Portada [KLP]

En el área de estudio se exponen en la vía Otavallo – Selva Alegre en contacto tectónico con la Fm. Natividad; de litología muy similar a la Fm. Pallatanga pero geoquímicamente diferenciados. Comprende Pillow basaltos y cadenas de lavas muy

oxidadas y alteradas (vetillas de calcita y vacuolas rellenas de zeolita); la alteración incrementa hacia el contacto con la Fm. Silante (Vallejo, 2007; van Thournout et al., 1992). La fauna fósiles foraminífera que presenta la formación indican una edad Santoniana a Campaniano temprano (86 ~ 83 Ma)

Formación Pilatón [KPI]

Aflora al occidente del área de estudio en contacto fallado con la Fm. La Portada, posee un espesor aproximado de 2000m. Comprende una secuencia de capas de areniscas turbidíticas gruesas y microbrechas ricas en fragmentos y líticos volcánicos. Van Thournout (1991) reporta intercalaciones basálticas dentro de rocas sedimentarias a lo largo de la vía Ibarra – Lita al norte del área de estudio. Sigal (1968) reporta edades Senoniana (88.5 – 65 Ma) en fauna foraminífera.

Formación Natividad [KN]

Aflora en la vía Otavalo – Selva Alegre en contacto fallado con la Fm. La Portada. Comprende rocas sedimentarias depositados en un ambiente turbidítico compuesto por areniscas, lodolitas, cherts, intercalaciones de lavas y tobas basálticas, localmente con diques. Vallejo (2007) basado en fauna foraminífera indica una edad Campaniana a Maastrichtiana (83 – 66 Ma) para esta formación.

Formación Río Cala [KRC]

Aflora en el borde nororiental de la Cordillera Occidental en contacto tectónico con la Fm. Pallatanga y sobreyace a la Fm. Natividad, afloramientos representativos ocurren en la vía Otavalo – Selva Alegre. Su litología comprende lavas basálticas a andesíticas masivas, brechas volcánicas y areniscas volcanoclásticas menores. Vallejo (2007) data a esta formación en 66.7 ± 7.16 Ma (límite Cretácico – Paleógeno).

Formación Yunguilla [KY]

En el área de estudio aflora únicamente al sur-occidente donde se acuña entre las formaciones Natividad y La Portada. Litológicamente muy variable, típicamente compuesto de limolitas masivas grises oscuras, chert pelágicos, areniscas de grano fino bien clasificadas y calciturbiditas. Varios trabajos con fines de datar a esta formación se han elaborado y la mayoría recae en una edad Campaniana tardía a Maastrichtiana (~72 Ma).

Formación Silante [EOS]

Aflora en la vía Otavalo – Selva Alegre en contacto fallado con la Fm. La Portada, se reportan potencias de hasta 5400 m (Henderson, 1979) pero es difícil estimarlas debido al plegamiento de esta formación. Comprende canales conglomeráticos y brechas, lahars, lodolitas rojas, limolitas y tobas violáceas. En los conglomerados los clastos son similares con las formaciones Yunguilla, Pallatanga y Río Cala. Además presenta una secuencia volcánica en sus niveles intermedios; andesitas, conglomerados volcánicos y brechas (facies volcánicas Tandapi). Edades entre 53 Ma

(Aspden et al., 1992) a 66 Ma (Hungerbühler et al., 2002) son indicadas para esta formación.

Formación El Laurel [EL]

Restringido a la parte occidental del área de estudio en contacto con el intrusivo de Apuela; comprende capas finas de lodolitas grises y negras intercaladas con areniscas finas suprayacidas por calizas. Van Thournout sugiere potencias que no exceden los 1800m.

Batolito de Apuela [GQd]

Es una cuarzo-diorita de grano medio a grueso, con hornblenda y biotita, geoquímicamente es un granitoide cálcico tipo I, con una edad entre los 16.5 ± 1.1 Ma. La intrusión de este batolito metamorfizó las calizas de la Fm. El Laurel, por lo que en el área de estudio existe actividad minera, en las zonas colindantes a este contacto, para la producción de cemento.

Volcánicos del Mioceno-Holoceno

Varios edificios volcánicos cubren las rocas más antiguas de la Cordillera Occidental de los Andes entre ellos el complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha con sus productos volcánicos, a continuación se menciona únicamente los edificios volcánicos que involucra el área de estudio, del más antiguo al más joven. La información fue extraída del documento presentado por Bernardo Beate para el proyecto BGS-CODIGEM (2000) entre otros autores con estudios más recientes.

Volcánicos Cuchinrumi [AACsh, RDCsh]

A 10 km al sur del lago Cuicocha, es un edificio volcánico andesítico que presenta facies más diferenciadas evidenciadas por los domos dacíticos (RDCsh). Su edad de acción se estima en el cuaternario inferior y sus productos efusivos sobreyacen a rocas de la Cordillera Occidental.

Volcánicos Fuya-Fuya/Mojanda [TDFFF/Moj]

El volcán Mojanda de edad 0.6 Ma (Barberi et al., 1988) sobreyace a rocas no aflorantes del basamento pre -Terciario. Comprende flujos y brechas andesíticas básicas. Adyacente se encuentra el volcán Fuya – Fuya (Pleistoceno temprano a medio) que al igual que Mojanda presenta grandes calderas producto de una actividad efusiva-explosiva que depositó flujos piroclásticos (TD FF/Moj) y depósitos de avalancha de escombros.

Vocánicos Cotacachi [AACot, AvlCot, RDCot]

Es un estrato-volcán de edad Pleistocénica temprana a media (0.6 Ma), afectado por erosión glacial y su flanco sur por depósitos del volcán Cuicocha (TDCui) que cubren los depósitos de Cotacachi. Comprende principalmente andesitas (AACot), avalanchas de escombros (AvlCot) y domos dacíticos en su cumbre y en su flanco NE (RDCot, RDPrb, RDCz) corresponden a las actividades más jóvenes aparte de Cuicocha (Piribuela).

Volcánicos Imbabura [AAImb, AvlImb, TDImb]

Ubicado en el Valle Interandino es un estratovolcán de edad Pleistoceno superior que comprende lavas andesíticas (AAImb) cubiertas por flujos piroclásticos (TDImb) y hacia su flanco Norte se extiende un depósito de avalancha de escombros (AvlImb) su última etapa presenta domos dacíticos (RDImb).

Volcánicos Cuicocha [TDCui, RDCui]

Este volcán se abordará en el siguiente apartado (8.3.4)

Relleno del Valle Interandino [PI-PD]

Comprende paquetes de sedimentos epiclásticos y volcanoclásticos distales primarios y retrabajados, indiferenciados de fuente predominante volcánica y de edad inferida Plio-Cuaternaria. Están sobreyacidos por productos volcánicos Cuaternarios.

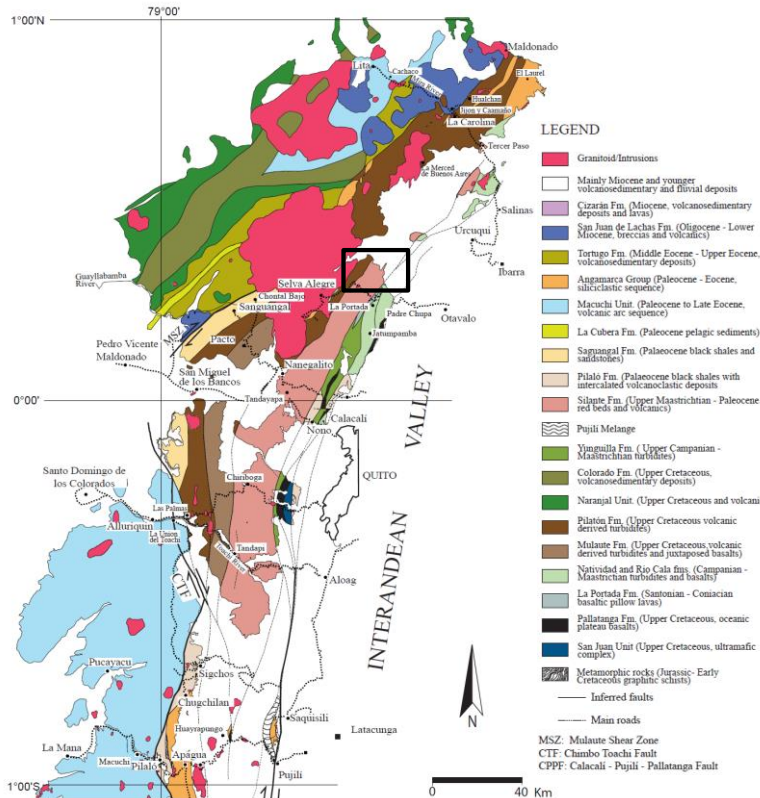


Fig. 14. Mapa de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 1°S y 1°N con las formaciones cretácicas a Paleógenas (Tomado de Vallejo 2007 en BGS-CODIGEM, 1996-2000). Nótese en recuadro negro el área de estudio

8.3.4 Marco Geológico Local

El volcán Cuicocha comprende uno de los cuatro centros eruptivos del complejo volcánico Cotacachi-Cuicocha (Muyurcu, Loma Grande, Piribuela y Cuicocha, del más antiguo al más joven). Su período de actividad data de 4490 – 2990 AP, con depósitos de hasta 150 m de espesor de flujos flujos piroclásticos (TDCui). El colapso del domo y la formación de la caldera fue posterior 2990±300 y 3100±150 AP (Mothes and Hall, 1991). La formación de los cuatro domos intracaldera (RDCui) se produjo entre 1350–1230 AP sin interacción lava-agua; y el lago se formó hace 1000-500 años

impermeabilizado por el relleno de material proveniente de las paredes de la caldera (Gunkel et al., 2009) y con el aporte hídrico originario del flanco sur del volcán Cotacachi.

Según Gunkel y Beulker (2009): el lago presenta dos cuencas, la primera se encuentra al este de las islas con 148 m de profundidad y la segunda hacia el occidente con 78m de profundidad máxima. La actividad post volcánica del volcán Cuicocha involucra emisión de gases volcánicos, manantiales hidrotermales y un flujo de calor estratificado en el fondo del Lago. Los manantiales han modificado la composición química del lago en aproximadamente un 30%; detectadas en la cuenca occidental del lago por un incremento en profundidad de la temperatura y disminución de la densidad.

Las evidencias termales superficiales ocurren en la orilla de la Isla Yerovi a los 5 -10 m de profundidad y aproximadamente 3000 m³ / día, se pierde por percolación en las fracturas y fisuras en la roca madre (Gunkel et al., 2008). Los Gases en Cuicocha son principalmente CO₂ y N₂ de origen netamente volcánico (Gunkel and Beulker, 2009; Gunkel et al., 2008). Las tasas más altas de desgasificación de CO₂ se producen a través de la superficie del lago y su tasa de emisión es de 53,1 ± 2 toneladas métricas por día; el máximo valor (48,5 gm⁻² d⁻¹) ocurre en la línea de la costa norte de la isla Yerovi, cerca de una emanación de burbujeo de gas visible (Padrón et al., 2008), Fig. 15.

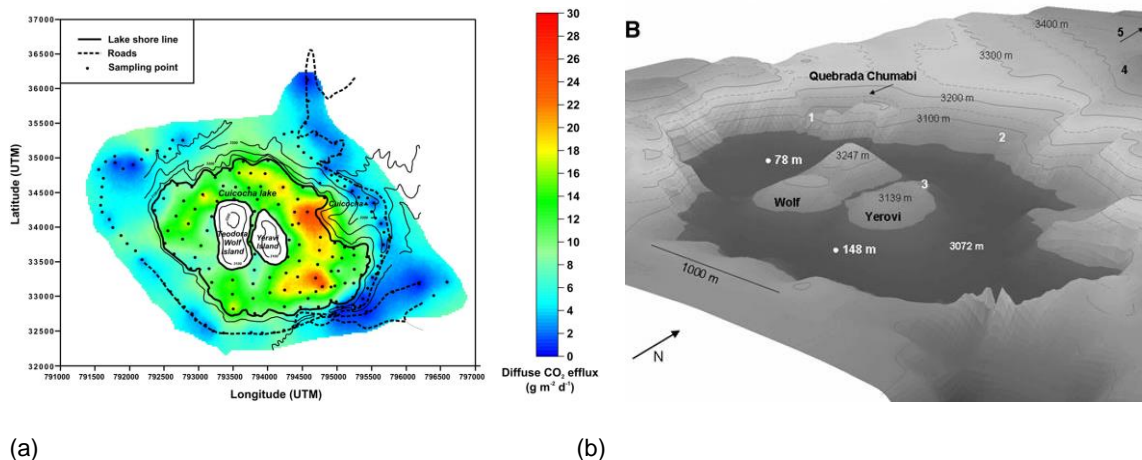


Fig. 15: (a) Distribución espacial de desgasificación de CO₂ difusa (tomado de Padrón et al., 2008). (b) Modelo digital de terreno del lago cratérico Cuicocha: 1. Cascada 2. Dos cascadas 3. Vertiente hidrotermal 4. y 5. Vertientes del flanco Cotacachi (tomado de Gunkel et al., 2011).

8.3.5 Análisis de teledetección

8.3.5.1 Análisis geológico-estructural

Varios sistemas de fallas regionales de tendencia NE ocurren en el área y marcan límites tectónicos entre unidades litológicas de la Cordillera Occidental. El área de estudio se encuentra influenciada por dos sistemas de fallas principales (Fig. 16):

- **La falla Otavalo** de movimiento dextral, considerada como la terminación sur de la falla El Ángel-Río Ambi (Soulas et al. 1991) la cual continúa en Colombia con el nombre de sistema de fallas Cauca-Patia. La falla El Ángel-Río Ambi en

su culminación se ensancha en varias ramas formando una estructura de cola de caballo.

- **La falla Huayrapungu** con movimiento de rumbo lateral derecho.

Adicionalmente estudios previos indican lineamientos que atraviesan el lago cratérico Cuicocha (Boland et al., 2000; Vallejo, 2007) y define el límite oriental de la Cordillera Occidental, identificado como el sistema de fallas Pallatanga.

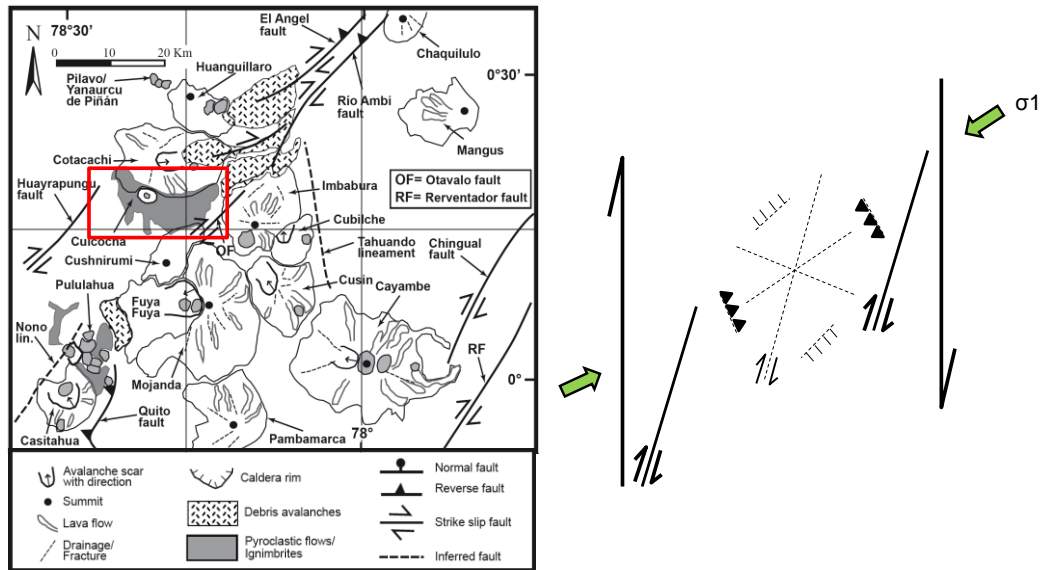


Fig. 16. izquierda: Estructuras principales en el área de investigación, marcado en rojo (tomado de (Andrade V., 2009)). Derecha: Diagrama de esfuerzos probables en la zona de estudio.

En base a los sistemas estructurales reconocidos en la zona y al análisis del sistema de esfuerzos coherentes con las estructuras (Fig. 16), se procedió a determinar lineamientos con ayuda de imágenes satelitales y MDT, siendo esta última la de mayor beneficio (ver Apéndice 28).

La imagen satelital usada fue cortesía del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con las siguientes características:

LANDSAT 8	
REQUEST_ID	0101402267522_00001
LANDSAT_SCENE_ID	LC80100602013268LGN00
STATION_ID	LGN
DATA_TYPE	L1T
ELEVATION_SOURCE	GLS2000
SPACECRAFT_ID	LANDSAT_8
SENSOR_ID	OLI_TIRS
NADIR_OFFNADIR	NADIR
DATE_ACQUIRED	2013-09-25
SCENE_CENTER_TIME	15:28:10.8123773Z

Debido a la abundante vegetación en el área de estudio, no se pudo aprovechar del todo la imagen satelital, sin embargo en zonas puntuales donde el análisis era óptimo, se obtuvo objetivos o sitios de interés para ser verificados en campo.

La combinación de bandas que mejor dieron resultados para el análisis de lineamientos estructurales fue 6, 5, 3 (R, G, B) y se complementó con el estudio de imágenes MDT.

8.3.5.2 Delimitación de alteración hidrotermal

El estudio de alteración hidrotermal se vio complicado debido a la abundante vegetación en la zona de estudio, sin embargo se resaltó la banda 7, 4, 2 (R, G, B) para alteración hidrotermal filtrada y superpuesta con índice de vegetación pero no se tuvo éxito.

8.3.5.3 Delimitación de anomalías térmicas

Anomalías de temperatura aparente se filtraron a partir de la banda 10 (Infrarrojo Termal 1); consecuentemente los datos obtenidos se contrastaron con la banda 5 y 4 (para filtrar vegetación) con la metodología descrita anteriormente (ver Apéndice 29, 30 y 31). El resultado obtenido identificó zonas puntuales de interés para verificar en campo.

En el caso de las anomalías aparentes el rango está entre 2°C y 42°C, tomando en cuenta la hora de toma de la imagen de satélite vegetación, las zonas pobladas, y nubes existentes en la zona, se ubicaron algunos objetivos de exploración que presentaban anomalías térmicas y zonas de alteración, ambas coincidentes.

La temperaturas anómalas varía entre 21°C para las islas intracaldéricas (considerando la temperatura ambiente es un valor anómalo) y 30°C.

8.3.6 Integración de datos

En base a la metodología recomendada para la recopilación de información, se obtuvo datos geoquímicos de la zona de estudio que sirvieron para el análisis e interpretación del sistema geotérmico (ver Apéndice 32).

La carencia de ciertos análisis químicos (aniones, cationes y/o isotopos) en varias de las investigaciones recopiladas, dificultó el estudio geoquímico del área de investigación y tuvo sus implicaciones en la estimación de temperaturas a partir de geotermómetros. No obstante el análisis preliminar arrojó los siguientes resultados:

- Las vertientes en el área de Cuicocha en su mayoría son bicarbonatadas magnésicas – sódicas, cloruradas cálcicas y sulfatadas cálcico sódicas (Fig.17).

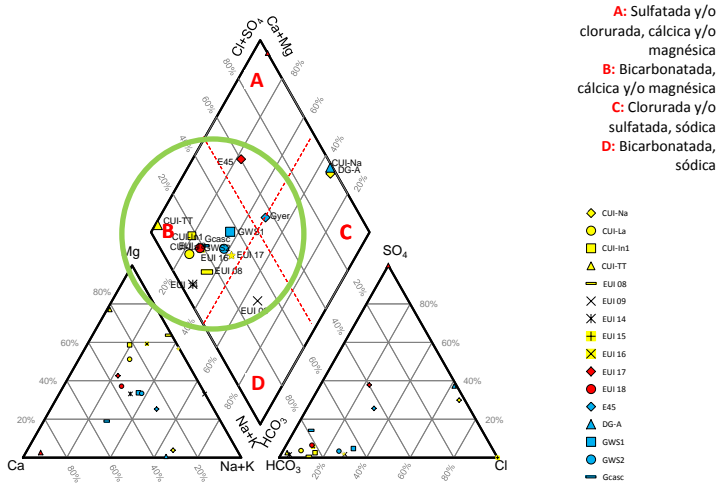


Fig. 17: Diagrama de Piper-Hill-Langelier para las aguas termales y frías en el área de estudio. En círculo el sistema Cuicocha.

- Las vertientes termales en el área de estudio provienen de reservorios diferentes, por lo que se puede hablar de dos sistemas (Fig. 18).

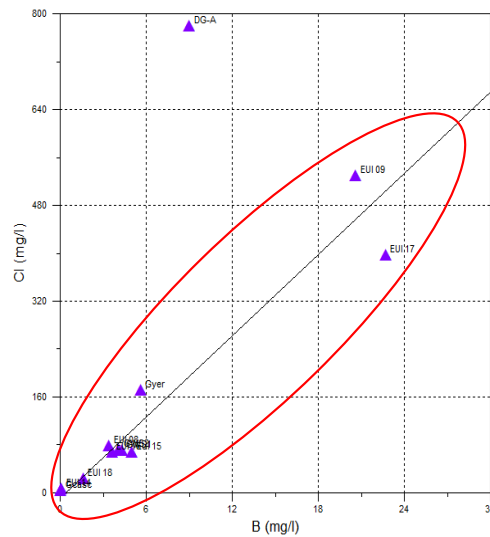


Fig. 18. Diagrama binario de Cl vs B de las aguas termales y frías en el área de estudio.

- Un incremento en 2H y 18O (Fig. 19) sugiere que los fluidos se han evaporado a baja temperatura, corroborado con el análisis de mezclas de aguas (Tabla 17) y el estudio geotermométrico. En base a este análisis se puede señalar un potencial de media a baja entalpía para el prospecto geotérmico Cuicocha.

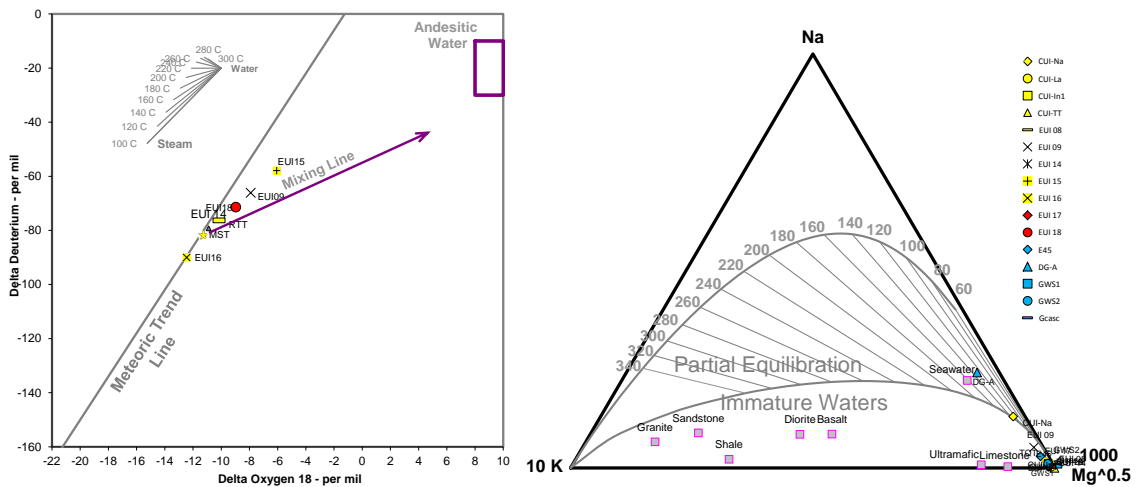


Fig. 19: (a) Diagrama 2H vs 18O (Datos OIEA, 1990). (b) Diagrama ternario de Giggenbach para las aguas termales y frías del área de estudio.

Solución 1	GWS2					Solución 1	EUI15				
Solución 2	EUI16					Solución 2	EUI16				
Muestra Optimizada	EU18					Muestra Optimizada	EUI09				
(mg/l)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Optimizada	mg/l	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Optimizada		
Na	61.7	104	36.7	60.854	Na		104	764			
K	5.7	7	5	5.674	K		7	29.6			
Ca	43.5	47.5	47.3	43.42	Ca		47.5	3			
Mg	30.5	125	29.4	28.61	Mg		125	205			
Cl	72	67.3	22.1	72.094	Cl	67	67.3	529	67.294		
HCO3	341	742.7	265.1	332.966	HCO3		742.7	2156.1			
B	4.1	3.6	1.6	4.11	SO4		41.2	41.8			
SO4	12.5	41.2	16.5	11.926	pH		6.6	7.3			
pH		6.6	6.7		18O		-6.07	-12.45	-7.91		
Temp		19.2	19.8		2H		-57.9	-90	-66.1		
									-89.358		

Tabla 17. Análisis de mezcla en las vertientes que indican un shift isotópico.

8.3.7 Modelo geológico conceptual

El basamento del lago caldérico Cuicocha está conformado por rocas volcánicas cretácicas tardías de origen oceánico (Unidad Pallatanga) y rocas volcánicas primarias (Formación Río Cala) de la Cordillera Occidental de los Andes. La permeabilidad del sistema estaría relacionada a estructuras regionales (Sistema de fallas Pallatanga), locales (Falla Huayrapungu) de movimiento dextral y el reservorio a material permeable producto de la formación de la caldera en su última etapa eruptiva hace 3100 A.P. Sin embargo no se descarta una permeabilidad secundaria en la Fm. Río Cala. La fuente de calor está relacionada a la cámara magmática bajo el lago caldérico Cuicocha (Ver Apéndice 33).

La principal vía de circulación de fluidos sería a través de zonas de debilidad, representadas por las fallas regionales que constituyen límites litotectónicos, A través de estas zonas las aguas meteóricas descenderían hasta calentarse y nuevamente ascender. Una importante mezcla de fluidos ocurre bajo la caldera debido a la gran

permeabilidad en consecuencia del colapso y las fracturas formadas; subsecuentemente los fluidos migran hacia el este (Fig. 20: modelo geológico).

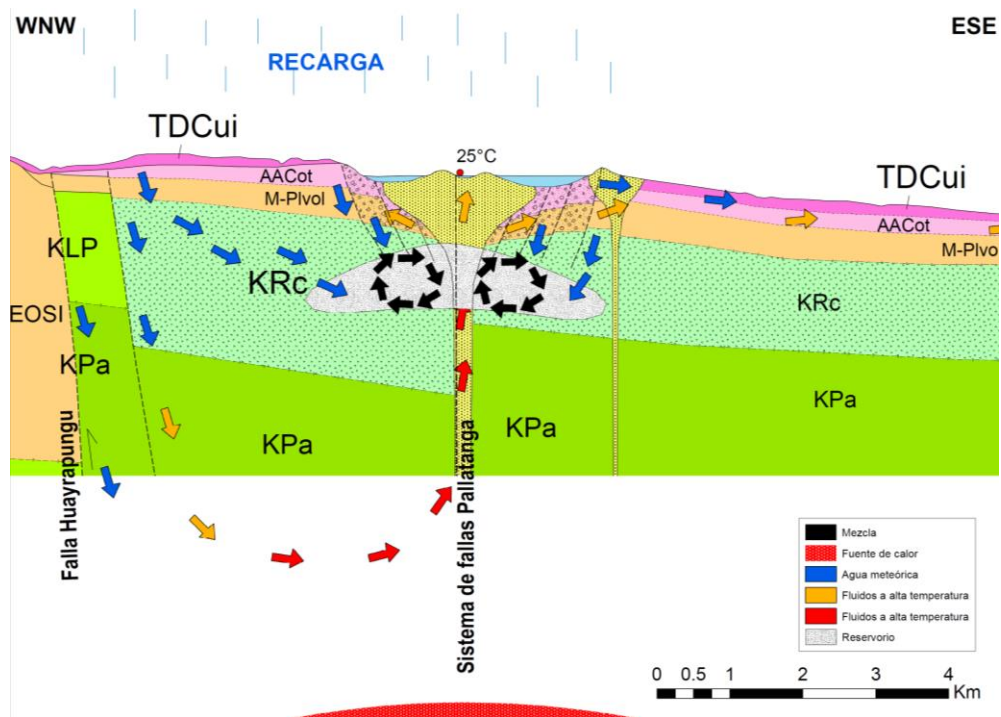


Fig. 20. Modelo geológico conceptual.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se pudo comprobar la importancia que merece el trabajo geológico de gabinete en la etapa de exploración de un proyecto geotérmico.
- La aplicación de estas técnicas permite jerarquizar los sitios de interés con un menor grado de incertidumbre, y plantear futuros sitios de exploración durante las investigaciones de campo.
- Éstas técnicas de exploración permiten optimizar tiempos y costos durante la etapa de trabajo de campo.
- Un trabajo de gabinete detallado permite plantear una clara lista de actividades necesarias para posteriores investigaciones en campo.
- Se pudo integrar y correlacionar datos litológicos, estructurales y de evidencias hidrotermales de cada caso de estudio.
- El análisis de anomalías térmicas por medio del procesamiento de imágenes satelitales, no es bien aplicable en el caso de zonas con gran cantidad de vegetación.

- Los resultados obtenidos a partir del análisis estructural mediante el procesamiento de imágenes satelitales y su comparación con la identificación de anomalías térmicas, permitieron verificar la estrecha relación existente entre los rasgos estructurales y las manifestaciones geotérmicas en superficie.

10. AGRADECIMIENTOS.

Para el desarrollo de este trabajo hemos recibido la ayuda de varias personas que han formado parte del Programa de Entrenamiento Geotérmico 2014. Entre ellos, principal instructor de trabajo, nuestro tutor Arturo Quezada, quien supo orientar nuestra línea de trabajo e involucrarnos en diversas actividades que nos han permitido adquirir información valiosa para llevar adelante esta investigación.

Agradecemos a los integrantes del segmento de Geología de la empresa La Geo, Oziel García, Julio Rubio, Claudia Pichardo y Claudia de Molina, quienes nos han recibido en su ambiente de trabajo con los mejores ánimos y han aportado información de importancia para este trabajo.

A Antonio Matus por aportar en el desarrollo de estudios complementarios de geoquímica. A Julio Guidos por aconsejarnos y orientarnos a la hora de comenzar con las ideas preliminares del trabajo.

También queremos agradecer al equipo de trabajo de cada uno de nuestros países en particular, más específicamente a INGEMMET en el caso de Perú e INNER en el caso de Ecuador.

Finalmente, queremos agradecer al apoyo de cada uno de nuestros compañeros; quienes nos han apoyado y compartido información para lograr finalmente nuestro objetivo; como así también al pilar más importante que ha sabido apoyar a cada uno de nosotros a la distancia, nuestras familias.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, H., Mamani, M., Alvan, A., Oviedo, M., Rodriguez, J.P., 2010. ACTIVIDAD TECTÓNICA DEL SISTEMA DE FALLAS INCAPUQUIO DURANTE LA FORMACION DE LA CUENCA AREQUIPA EN EL JURASICO. Congr. Peru. Geol. Soc. Geológica del Perú. Publicación Espec.
- Agencia de cooperación internacional del Japón (JICA), 2012. PLAN MAESTRO PARA EL DESARROLLO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL PERÚ-INFORME FINAL.
- Andrade V., S.D., 2009. The influence of active tectonics on the structural development and flank collapse of ecuadorian ARC volcanoes. Dr. Thesis: Université Blaise Pascal.
- Aspden, J.A., Litherland, M., 1992. The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador. *Tectonophysics* 205, 187–204. doi:10.1016/0040-1951(92)90426-7
- Barberi, F., Coltelli, M., Ferrara, G., Innocenti, F., Navarro, J.M., Santacroce, R., 1988. Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geol. Mag.* 125, 1–14.
- Boland, M.P., McCourt, W.J., Beate, B., 2000. Mapa geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0-1 N, escala 1/200.000. Minist. Energ. Min.-BGS publs., Quito.
- Carlotto, V., Quispe, J., Acosta, H., Rodríguez, R., Romero, D., Cerpa, L., Mamani, M., Díaz-martínez, E., Navarro, P., Jaimes, F., Velarde, T., Lu, S., 2009. Dominios geotectónicos y metalogénesis del Perú 89, 1–89.
- Cossio, A., Vargas, L., 1979. Perspectivas de desarrollo de la Energía Geotérmica. Prim. Simp. Nac. La Energía y sus Perspect. Tomo II. M, p.50.
- De la Cruz Bustamante, N., De la Cruz Matos, O., 2001. Memoria explicativa de la revisión geológica del cuadrángulo de Tarata (35-v), Escala 1:50 000. INGEMMET 19 p.
- Feininger, T., Bristow, C.R., 1980. Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. *Geol. Rundschau* 69, 849–874. doi:10.1007/BF02104650
- Fidel Smoll, L., Huamaní Huaccán, A., 2001. Mapa preliminar de amenaza volcánica potencial del volcán Yucamane. INGEMMET. Boletín. Ser. C Geodinámica e Ing. Geológica 26, 158.
- Goossens, P.J., Rose, W.I.J., 1973. Chemical Composition and Age Determination of Tholeiitic Rocks in the Basic Igneous Complex, Ecuador. *Geol. Soc. Am. Bull.* 84, 1043. doi:10.1130/0016-7606(1973)84<1043:CCAADO>2.0.CO;2

- Gunkel, G., Beulker, C., 2009. Limnology of the Crater Lake Cuicocha, Ecuador, a Cold Water Tropical Lake. *Int. Rev. Hydrobiol.* 94, 103–125.
doi:10.1002/iroh.200811071
- Gunkel, G., Beulker, C., Grupe, B., Gernet, U., Viteri, F., 2011. Aluminium in Lake Cuicocha, Ecuador, an Andean Crater Lake: Filterable, Gelatinous and Microcrystal Al Occurrence. *Aquat. Geochemistry* 17, 109–127.
doi:10.1007/s10498-010-9114-z
- Gunkel, G., Beulker, C., Grupe, B., Viteri, F., 2008. Advances in Geosciences Hazards of volcanic lakes : analysis of Lakes Quilotoa and Cuicocha , 29–33.
- Gunkel, G., Beulker, C., Grupe, B., Viteri, F., 2009. Survey and assessment of post volcanic activities of a young caldera lake, Lake Cuicocha, Ecuador. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 699–712. doi:10.5194/nhess-9-699-2009
- Hall, M.L and Beate, B., 1991. El Volcanismo Plio-cuaternario en los Andes del Ecuador. *Est. Geogr. Vol 4. Corp. Ed. Quito.*
- Hughes, R.A., Pilatasig, L.F., 2002. Cretaceous and Tertiary terrane accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador. *Tectonophysics* 345, 29–48.
doi:10.1016/S0040-1951(01)00205-0
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Eggez, A., Peterson, D.E., Helg, U., Hammer, C., 2002. Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Rev.* 57, 75–124.
- INGEMMET-Electroperú, 1994. Reporte de Actividades de la Dirección de Geotermia.
- Jacay, J., Sempere, T., Husson, L., Pino, A., 2002. STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE INCAPUQUIO FAULT SYSTEM , SOUTHERN PERU. *Int. Symp. Andean Geodyn.* 319–321.
- Jaén La Torre, H., 1965. Geología de Cuadrángulo de Tarata (hoja 35.v). INGEMMET. *Boletín. Ser. A Cart. Geológica Nac.* 11, 91.
- Jaillard, E., Bengtson, P., Ordoñez, M., Vaca, W., Dhondt, A., Suárez, J., Toro, J., 2008. Sedimentary record of terminal Cretaceous accretions in Ecuador: The Yunguilla Group in the Cuenca area. *J. South Am. Earth Sci.* 25, 133–144.
- Jaillard, E., Ordoñez, M., Suárez, J., Toro, J., Iza, D., Lugo, W., 2004. Stratigraphy of the late Cretaceous–Paleogene deposits of the cordillera occidental of central Ecuador: geodynamic implications. *J. South Am. Earth Sci.* 17, 49–58.
doi:10.1016/j.jsames.2004.05.003
- Ke-sheng, S.H.U., Ming-yuan, H.U.O., 2010. Application of Remote Sensing Technology in Geothermal Exploration : a Case Study of Taizhou City in Jiangsu Province. *World Geotherm. Congr. Bali, Indones.* 1100.

- Lavenu, A., Baudino, R., Égo, F., 1996. Stratigraphie des dépôts tertiaires et quaternaires de la dépression interandine d'Équateur (entre 0 et 2 15'S). Bull. l'Institut Français d'Études Andin. 25, 1–15.
- Litherland, M., Aspden, J.A. (John A.), Jemielita, R.A. (Richard A.), Survey, B.G., 1994. The metamorphic belts of Ecuador / M. Litherland, J.A. Aspden and R.A. Jemielita. Keyworth, Nottingham : British Geological Survey.
- Mamani, M., Wörner, G., Sempere, T., 2010. No Title Geochemical variations in igneous rocks of the Central Andean orocline (13°S to 18°S): Tracing crustal thickening and magma generation through time and space. Geol. Soc. Am. Bull. vol. 122,, 162–182.
- Manrique, N., Mariño, J., Samaniego, P., Fidel, L., 2010. Datos preliminares sobre la evolución vulcanológica del complejo volcánico tutupaca.
- Marchionni, D., Tessone, M., 2009. Cartografía geológica y reconocimiento de áreas de alteración hidrotermal con imágenes LANDSAT-TM en el área de La Manchuria, Macizo del Deseado, Patagonia Argentina. An. XIV Simpósio Bras. Sensoriamento Remoto, Natal, Bras. 25-30 abril 2009, INPE, p. 3269-3276. 3269–3276.
- Mboin, I., Yator, E., 2000. Application of Digital Elevation Models in Menengai Geothermal Field.
- MEER, 2010. Plan para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos en el Ecuador.
- Mia, B., Fujimitsu, Y., 2012. Mapping hydrothermal altered mineral deposits using Landsat 7 ETM+ image in and around Kuju volcano, Kyushu, Japan. J. Earth Syst. Sci. 121, 1049–1057. doi:10.1007/s12040-012-0211-9
- Morche, W., De la Cruz Bustamante, N., 1994. Geología y petrografía de los volcanes pleistocénicos Yucamane y Tutupaca (Tacna). Congr. Peru. Geol. Resúmenes Extendidos 209–213.
- Mothes, P., Hall, M.L., 1991. El paisaje interandino y su formación por eventos volcánicos de gran magnitud. El paisaje volcánico la sierra ecuatoriana Geomorfología. fenómenos volcánicos y Recursos. Asoc. Estud. Geogr. 4, 19–38.
- OLADE, 1994. Guía Estudios de Reconocimiento y Prefactibilidad Geotérmicos. Quito, Ecuador.
- Padrón, E., Hernández, P. a., Toulkeridis, T., Pérez, N.M., Marrero, R., Melián, G., Virgili, G., Notsu, K., 2008. Diffuse CO₂ emission rate from Pulumahua and the lake-filled Cuicocha calderas, Ecuador. J. Volcanol. Geotherm. Res. 176, 163–169. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.11.023

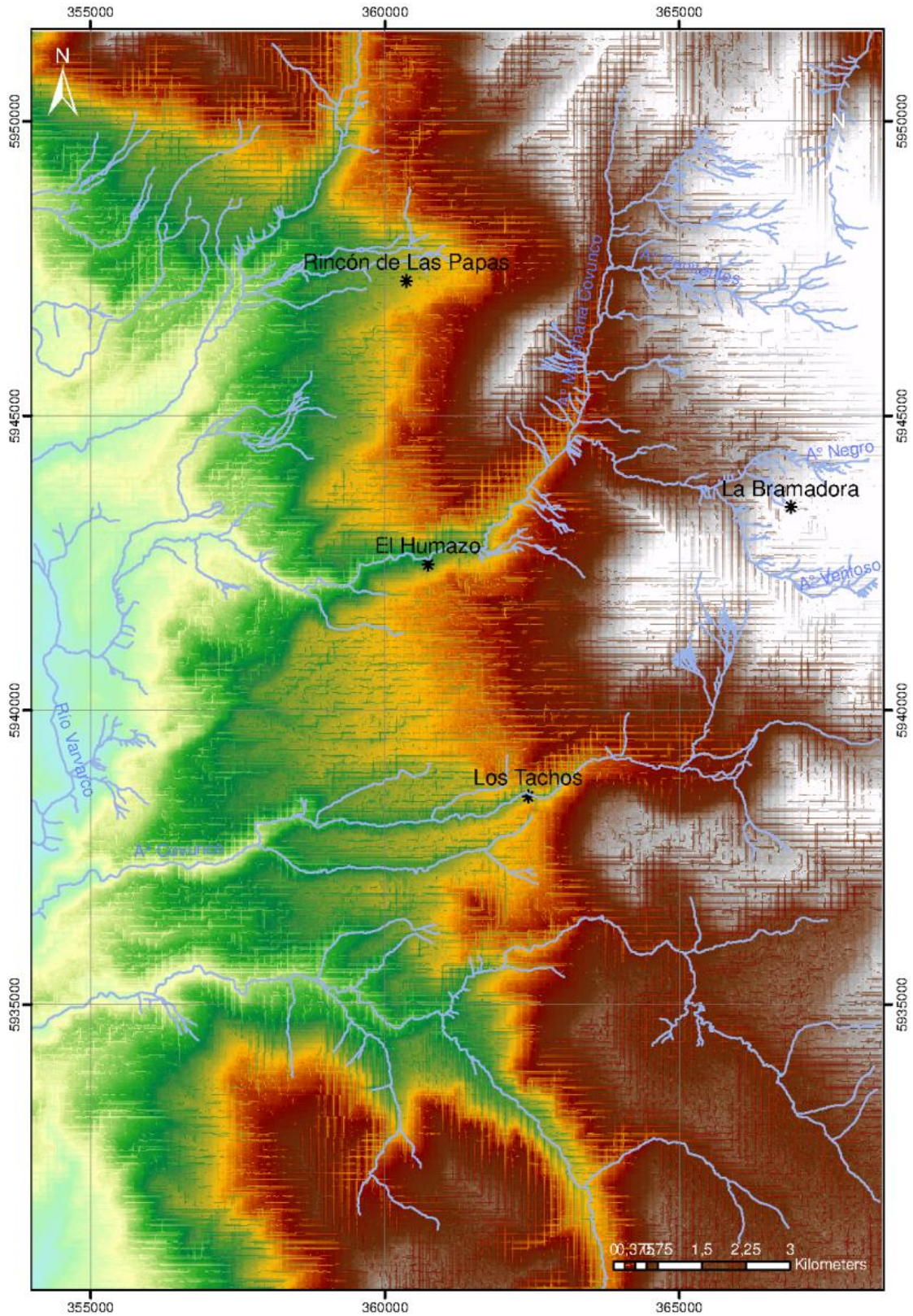
- Pratt, W.T., Duque, P., Ponce, M., 2005. An autochthonous geological model for the eastern Andes of Ecuador. *Tectonophysics* 399, 251–278. doi:10.1016/j.tecto.2004.12.025
- Rivera Porras, M.A., Mariño Salazar, J., 2004. Volcán Yucamane (sur del Perú): geología, petrología y evaluación preliminar de las amenazas volcánicas. *Soc. Geológica del Perú* 67–84.
- Rivera Porras, M.A., Villacorta, S., 2004. Volcán Yucamane (sur del Perú): estudio geológico preliminar y evaluación de las amenazas volcánicas. *Congr. Peru. Geol. Resúmenes extendidos* 582–585.
- Rodriguez Aycho, F.G., 2008. UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO. Tesis de Grado.
- Siahaan, M.N., Soebandrio, A., Wikantika, K., 2011. GEOTHERMAL POTENTIAL EXPLORATION USING REMOTE SENSING TECHNIQUE (CASE STUDY : PATUHA AREA, WEST JAVA). *Asi Geospatial Forum*.
- Spikings, R.A., Winkler, W., Hughes, R.A., Handler, R., 2005. Thermochronology of allochthonous terranes in Ecuador: Unravelling the accretionary and post-accretionary history of the Northern Andes. *Tectonophysics* 399, 195–220. doi:10.1016/j.tecto.2004.12.023
- Spikings, R.A., Winkler, W., Seward, D., Handler, R., 2001. Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* 186, 57–73.
- Stefansson, V., 2005. *World Geothermal Assessment* 24–29.
- Thorpe, R.S., 1984. The Tectonic Setting of Active Andean Volcanism, in: Harmon, R.S., Barreiro, B.A. (Eds.), *Andean Magmatism SE - 1*. Birkhäuser Boston, pp. 4–8. doi:10.1007/978-1-4684-7335-3_1
- Tshopp, H., 1953. Oil explorations in the Oriente of Ecuador 1938-1950. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.* 37, 2303–2347.
- Vallejo, C., 2007. Evolution of the Western Cordillera in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene). [Ph.D. thesis] Zürich, Switzerland, Inst. Geol. ETH Zürich, 208 p., <http://e-collect.ethz.ch/collect/ethz/theses/vallejo>. [Ph.D. thesis]: Zürich, Switzerland, Institute of Geology, ETH Zürich.
- Van Thournout, F., Hertogen, J., Quevedo, L., 1992. Allochthonous terranes in northwestern Ecuador. *Tectonophysics* 205, 205–221. doi:10.1016/0040-1951(92)90427-8
- Yamaguchi Y et al., 1996, 1996. Remote Sensing for geothermal applications.

12. APÉNDICES

APÉNDICES

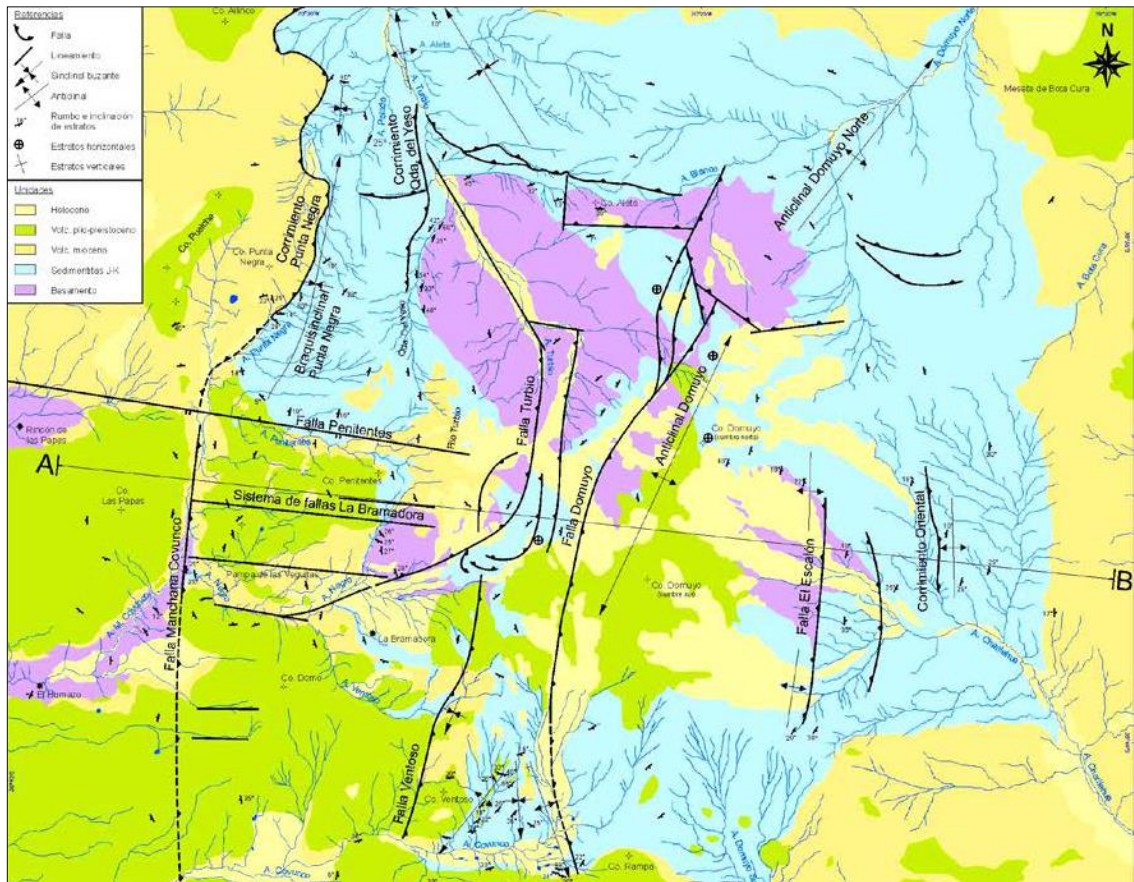
Caso de aplicación ARGENTINA

MAPA HIDROGRÁFICO Y UBICACIÓN DE MANIFESTACIONES TERMALES



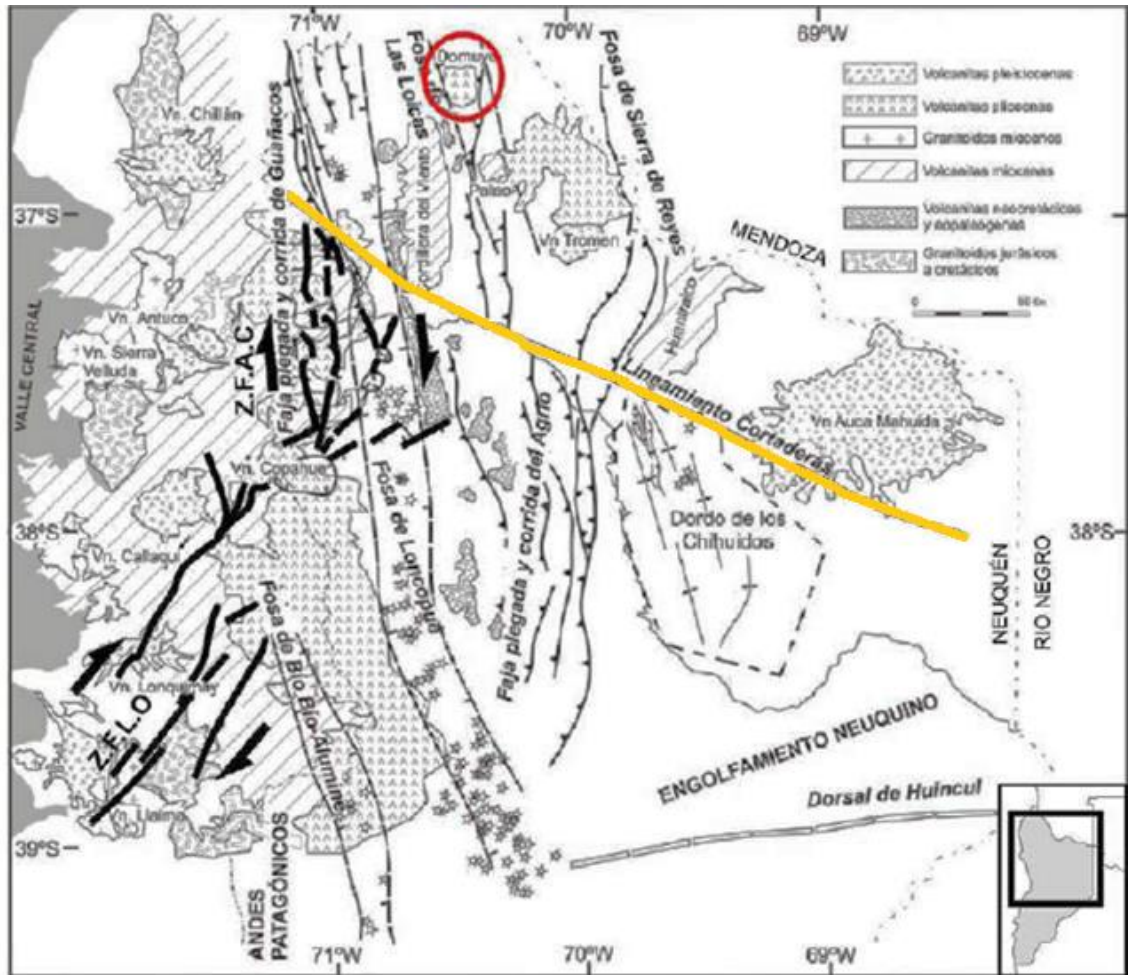
Apéndice 1

DOMINIOS ESTRUCTURALES DEL ÁREA DE TRABAJO

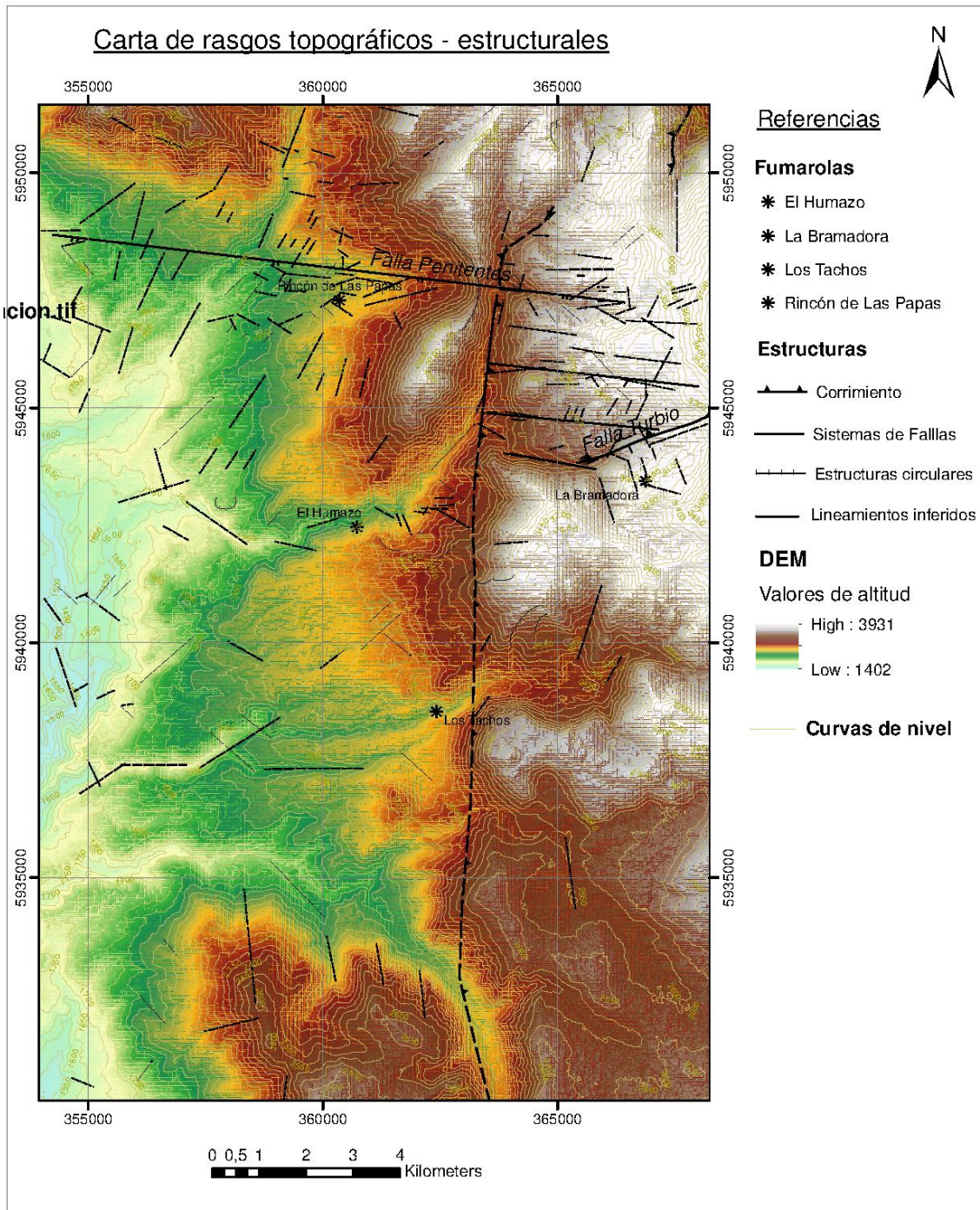


Apéndice 2: Dominios estructurales y ubicación de la sección estructural A-B (Mariot, 2008) utilizada para la elaboración del modelo geológico conceptual.

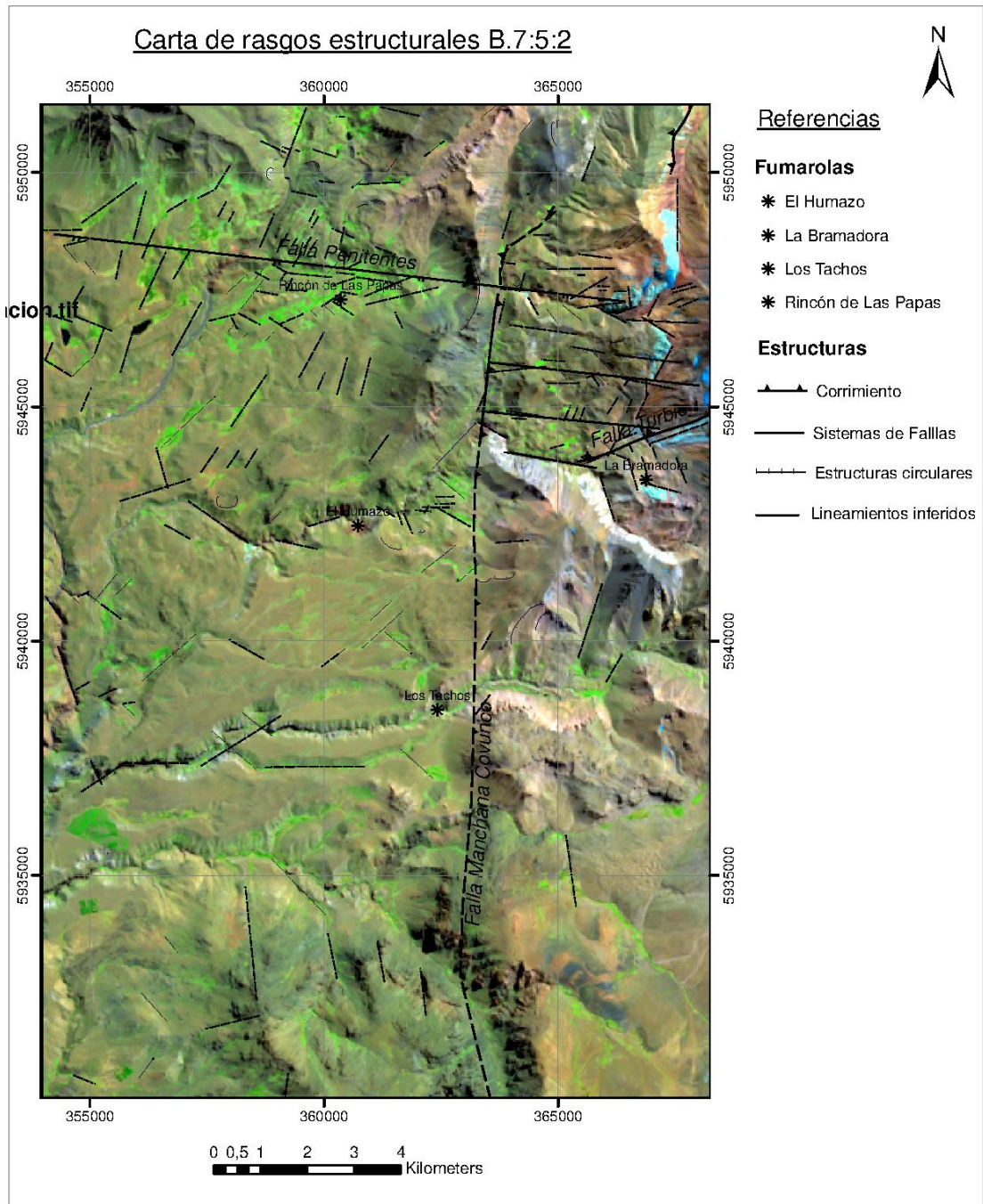
ESQUEMA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y MAGMATISMO ASOCIADO



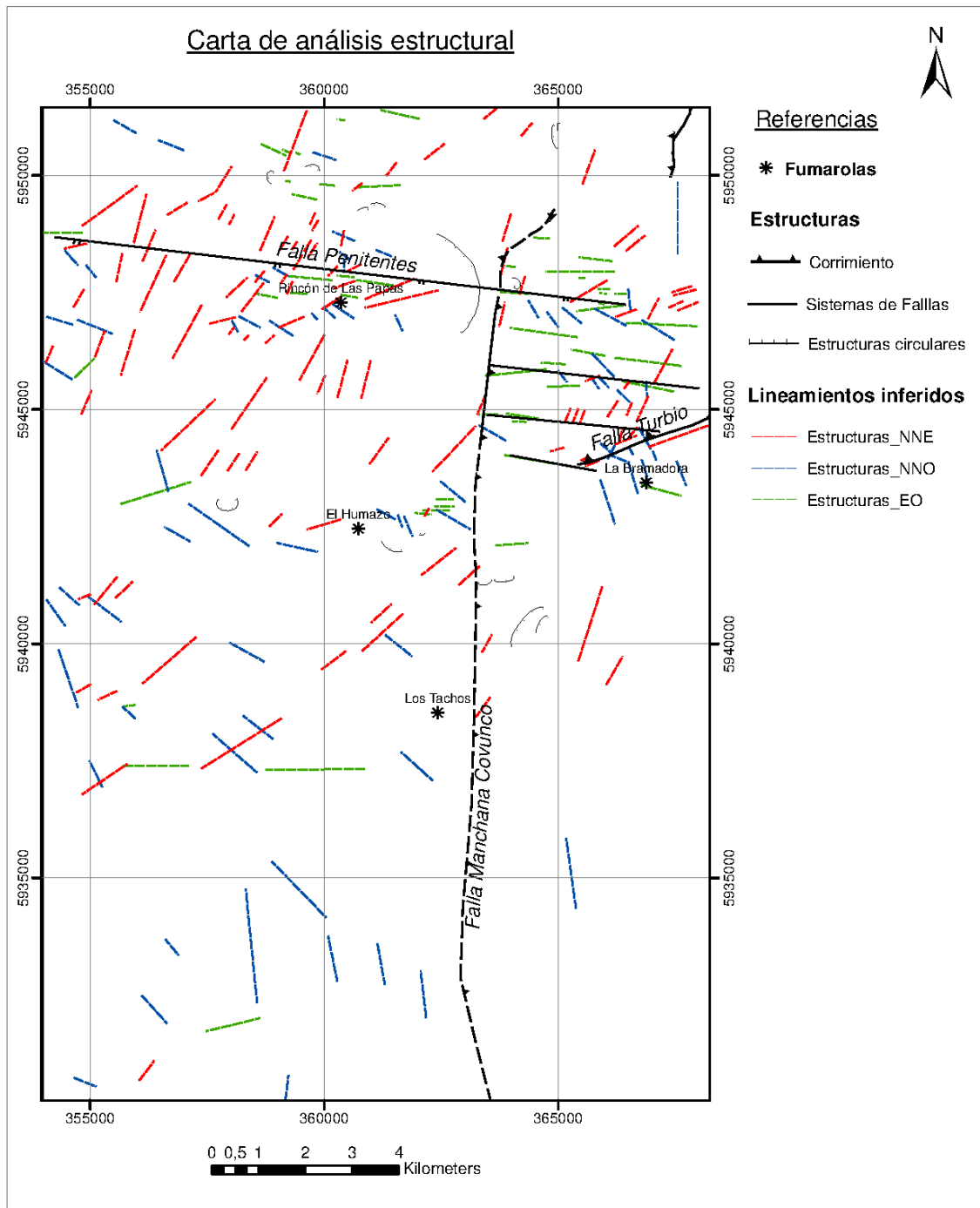
Apéndice 3. Sector andino, preandino y de antepaís para el sur de la provincia de Mendoza y norte de Neuquén. Z.F.L.O: Zona de falla de Liqueñe-Ofqui; Z.F.A.C: zona de falla de Antiñir-Copahue (basado en Ramos y Folguera, 2005c).



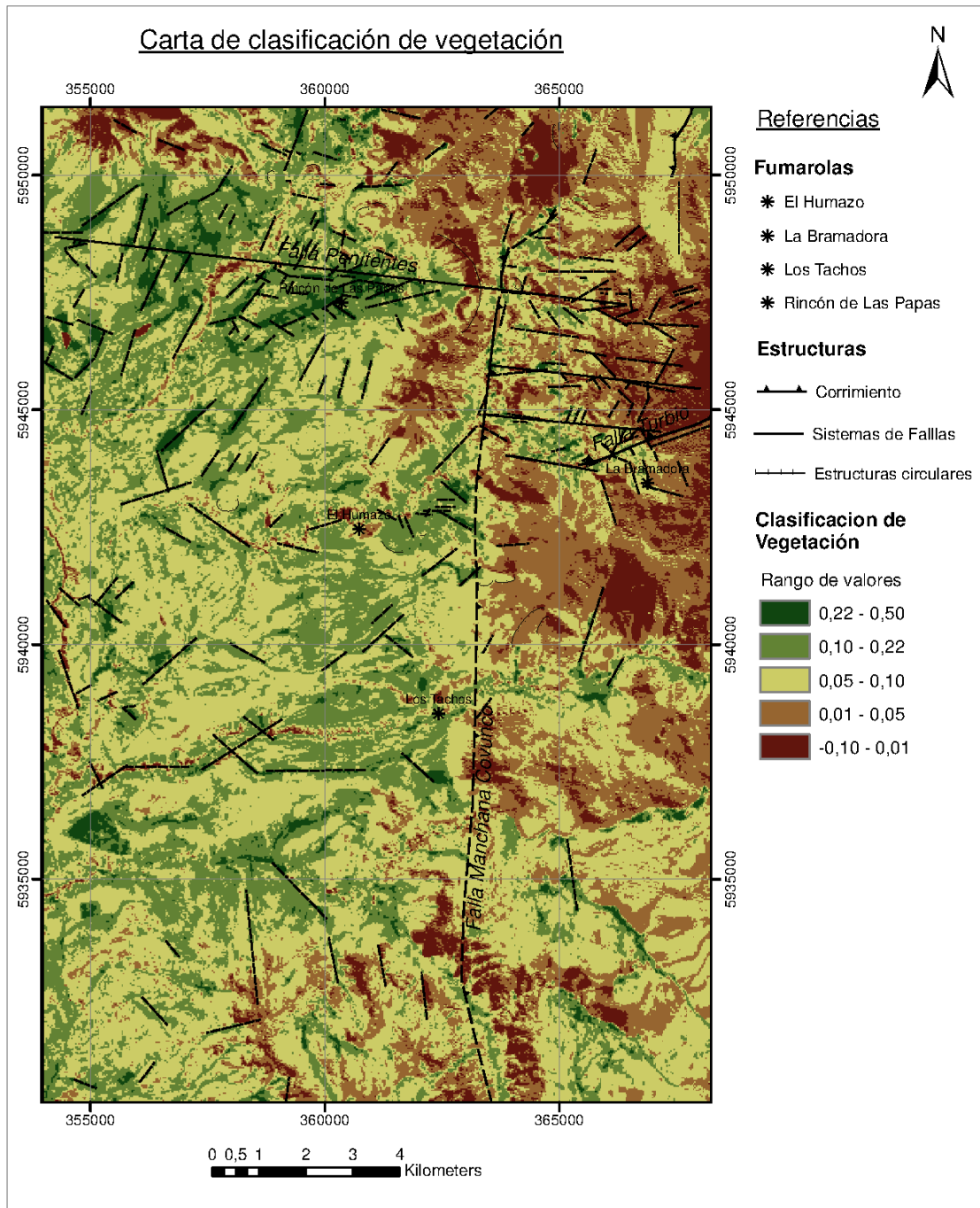
Apéndice 4. Carta Temática de rasgos topográficos y estructurales. Combinación de mapa de contornos, hillshade y TIN elaborado a partir de DEM.



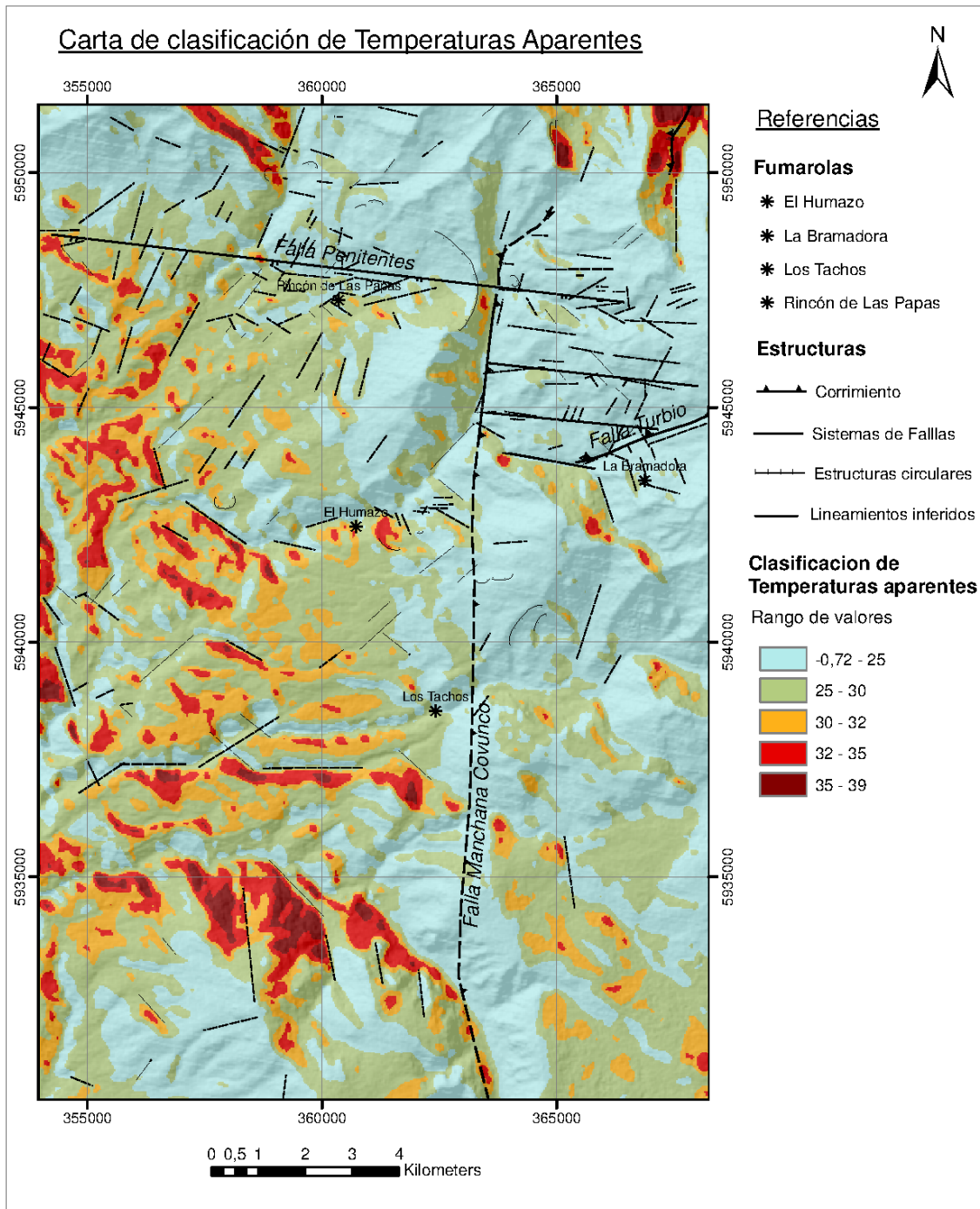
Apéndice 5



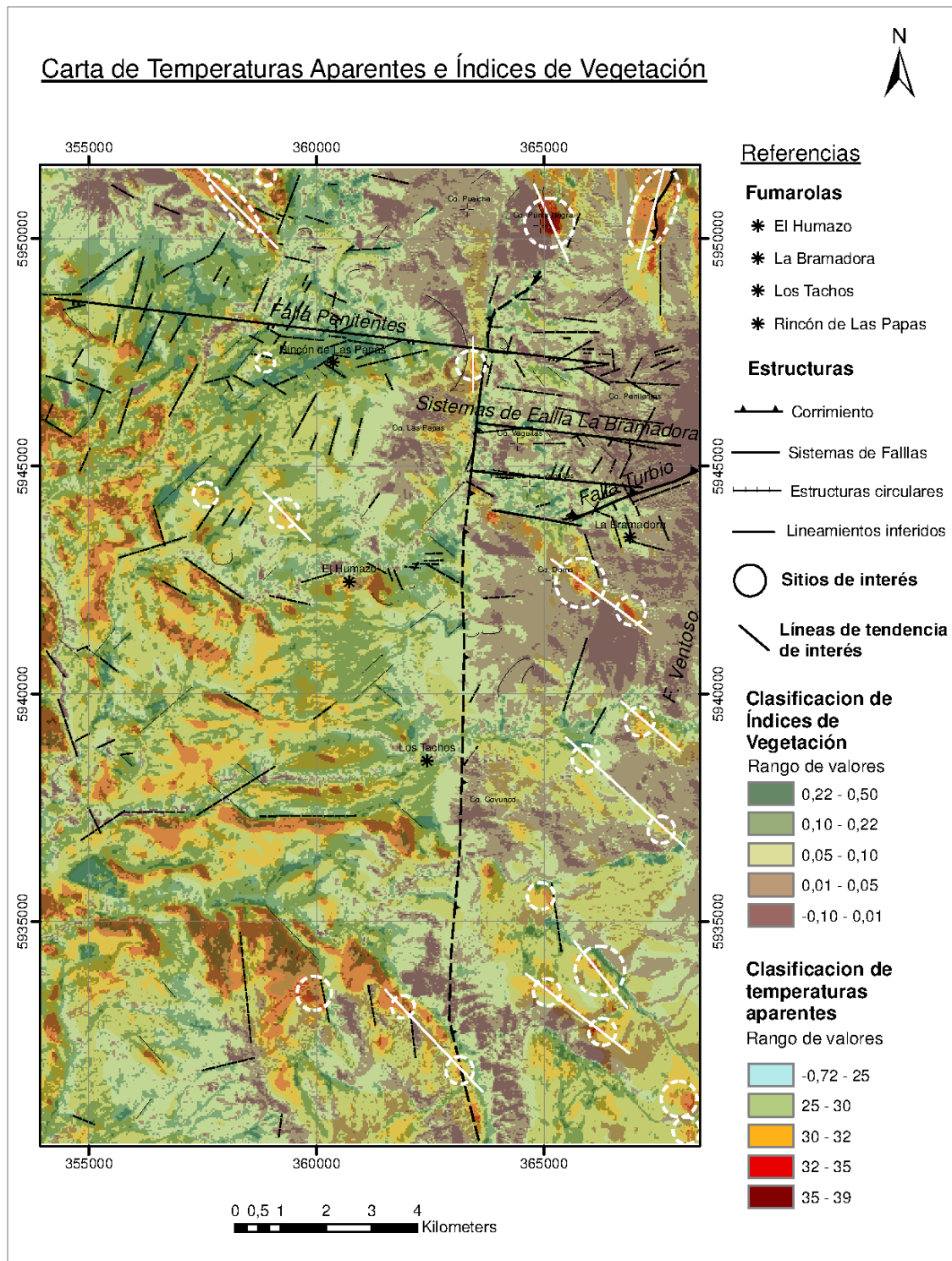
Apéndice 6



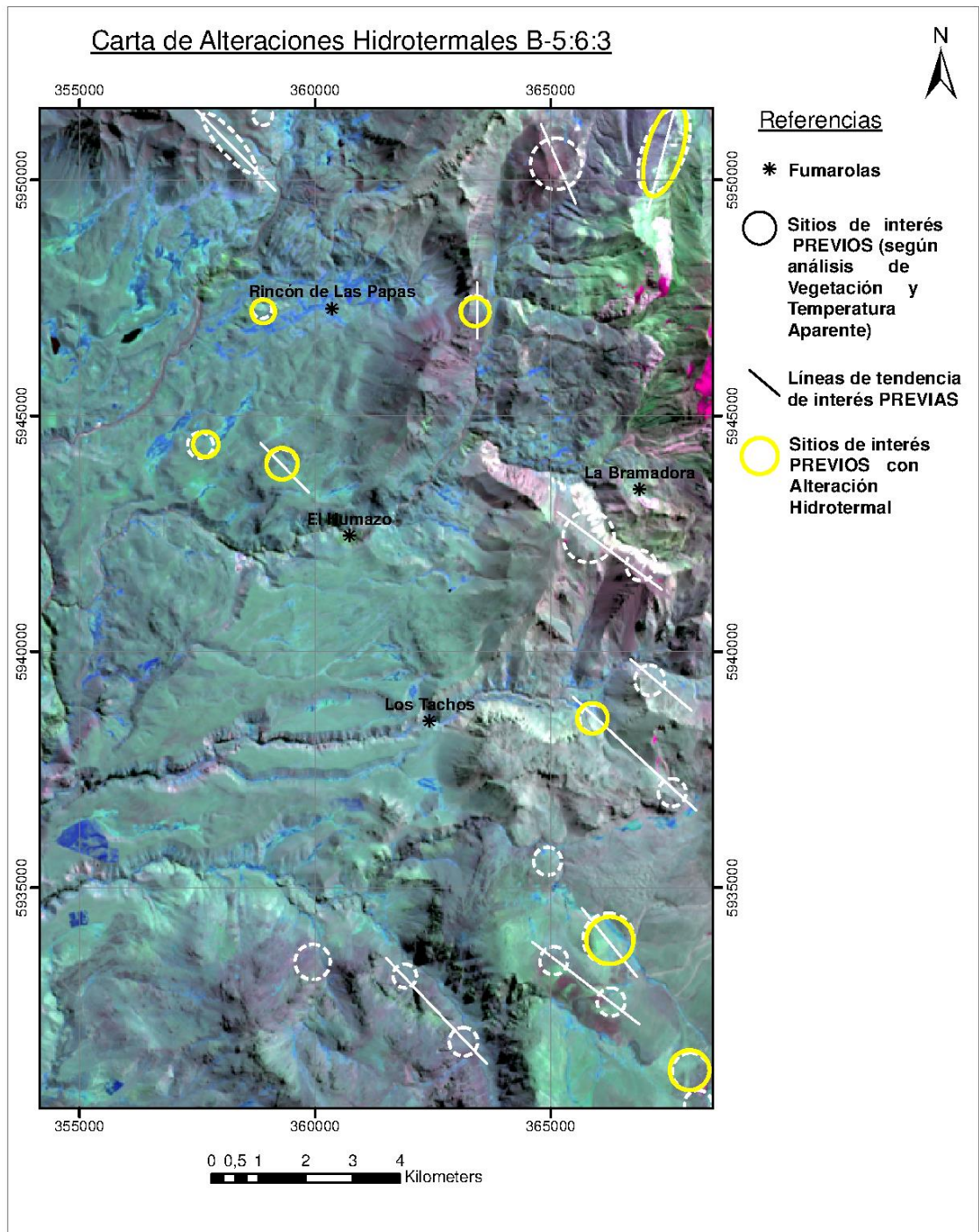
Apéndice 7. Obtenida mediante cálculo entre Bandas 4 y 5.



Apéndice 8. Obtenida mediante cálculo entre Bandas 10 y 11.



Apéndice 9. Obtenida mediante cálculo entre Bandas 10 y 11.



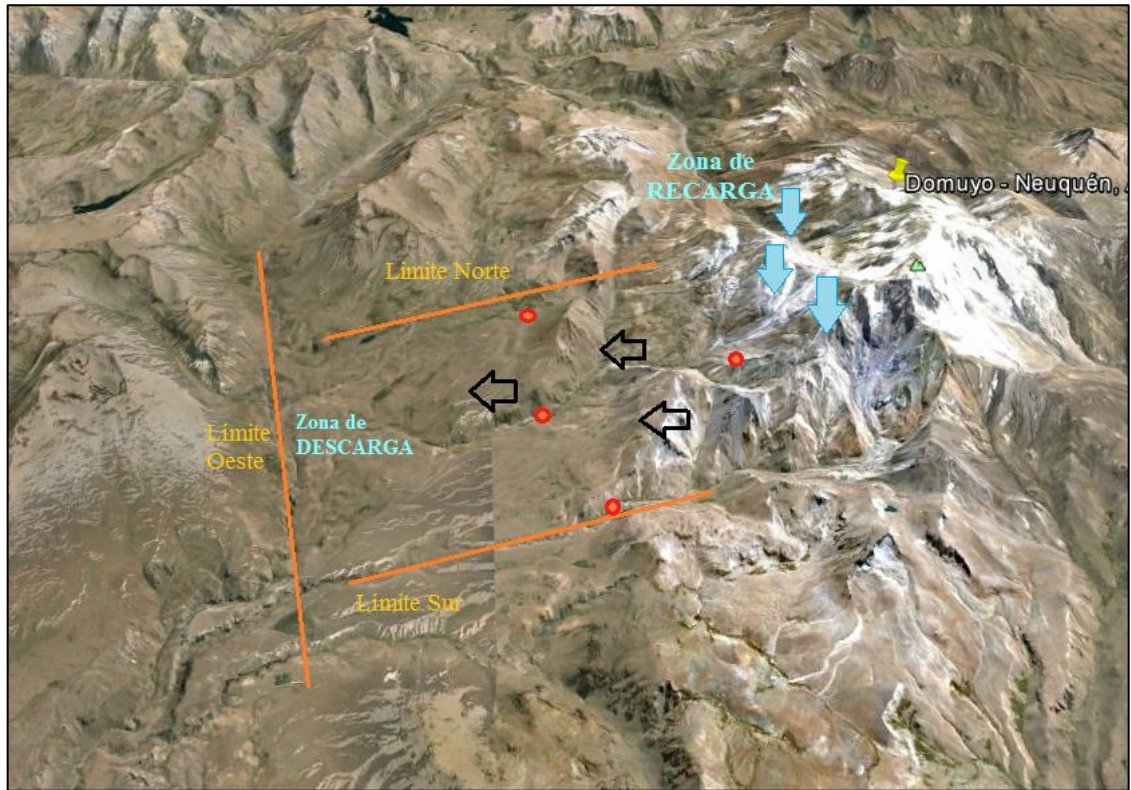
Apéndice 10. Obtenida mediante cálculo entre Bandas 10 y 11.

CUADRO DE SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA. UBICACIÓN DE POSIBLE SISTEMA GEOTÉRMICO

CUATERNARIO	HOLOCENO		Depósitos aluviales (Depósitos de terrazas aluviales y fondo de valle)	
			Depósitos de remoción en masa (Dep. De avalanchas de roca y flujos de detritos)	
CUATERNARIO	PLEISTOCENO	0,01	Depósitos glaciares y periglaciares (Dep. de morenas, glac. negros y glac. de roca)	
			Riolita Cerro Domo (Lavas riolíticas y dacíticas)	
			Formación Manchana Covunco (andesitas, basandesitas, banakitas, brechas tobáceas)	
NEÓGENO	PLIOCENO	1,81	Complejo Volcánico Domuyo (Intrusivo riolítico, piroclastitas y lavas dacíticas)	
	MIOCENO	5,33	Formación Quebrada Honda (Lavas basandesíticas y andesíticas piroxénicas, y aglom.)	
			Formación Cajón Negro (Aglomerados volcánicos y tobas lapillíticas)	
		Formación Charilehue (brechas, aglomerados, tobas y lavas basandesíticas)		
PALEÓGENO		23,03		
CRETÁCICO		65,5		
JURÁSICO	SUPERIOR	145,5	Formación Vaca Muerta (pelitas y pelitas calcáreas)	
			Formación Tordillo (areniscas y pelitas rojas continentales)	
			Formación Auquilco (yeso y areniscas yesosas)	
	MEDIO			
	INFERIOR			Formación Los Molles (pelitas y areniscas)
TRIÁSICO	SUPERIOR	199,6	Formación Milla Michicó (piroclastitas mesosilíceas y silíceas)	
			Formación Cordillera del Viento (Conglomerados, areniscas, volcanitas y piroclastitas)	
	MEDIO			
	INFERIOR		Complejo volcánico-plutónico Huingancó (granodioritas y microgranitos)	
PÉRMICO		251,0		
CARBONÍFERO		299,0		
DEVÓNICO		359,2		
SILÚRICO		416,0	Ectinita Guaraco Norte (metamorfitas de bajo grado)	

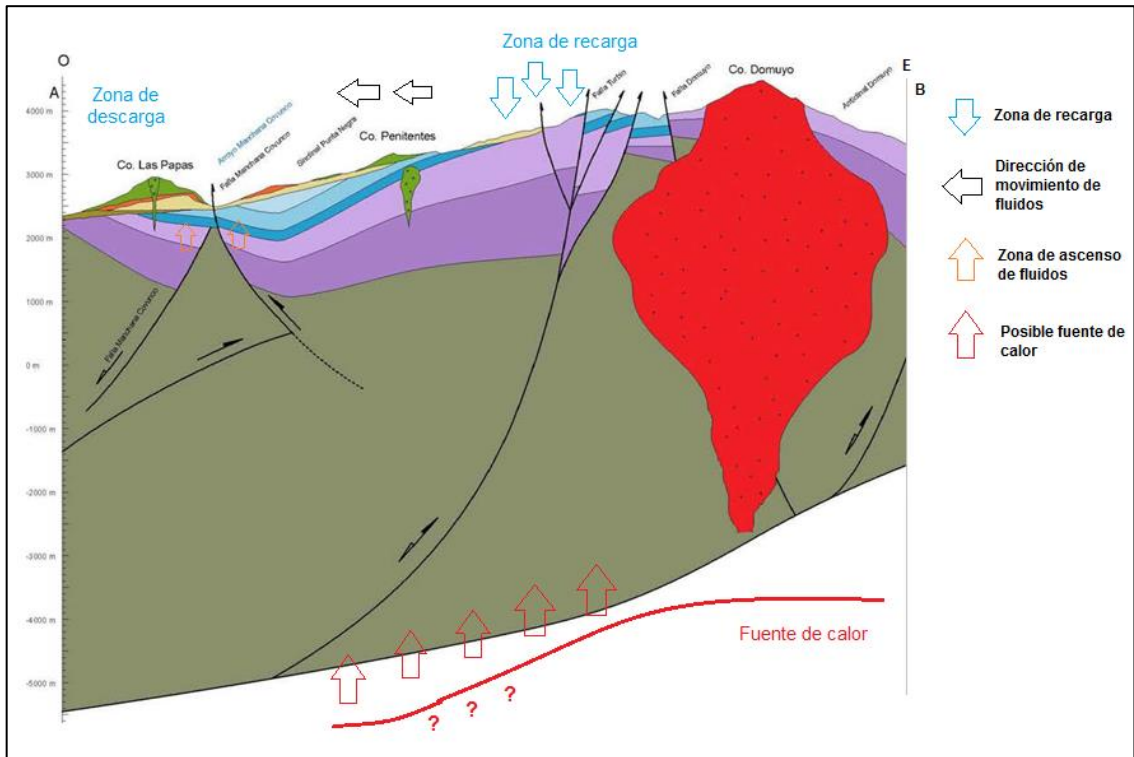
Apéndice 11. Basado en Mariot, 2008.

MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL EN PLANTA



Apéndice 12

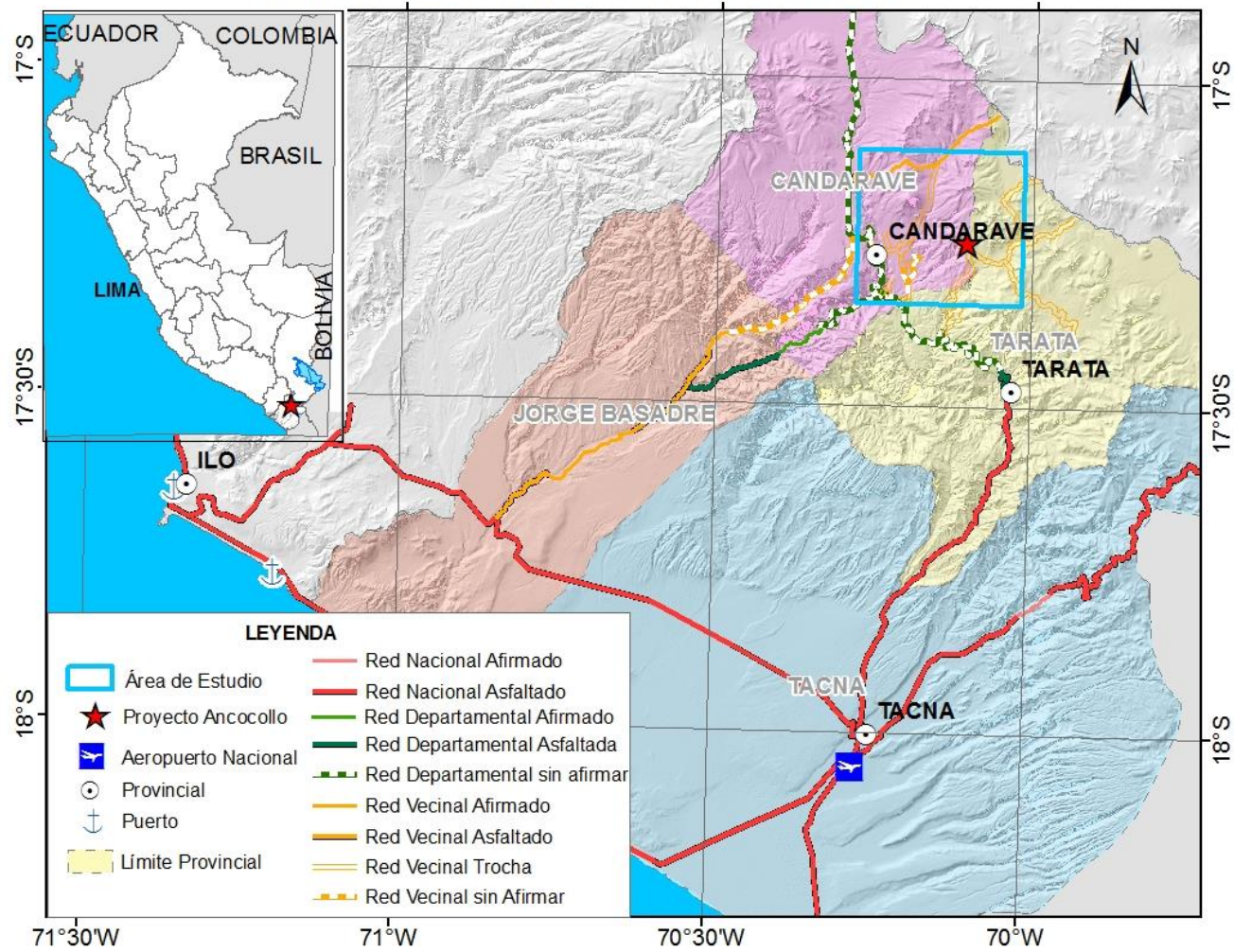
MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL EN CORTE



Apéndice 13. Sección estructural Mariot, 2008, modificado.

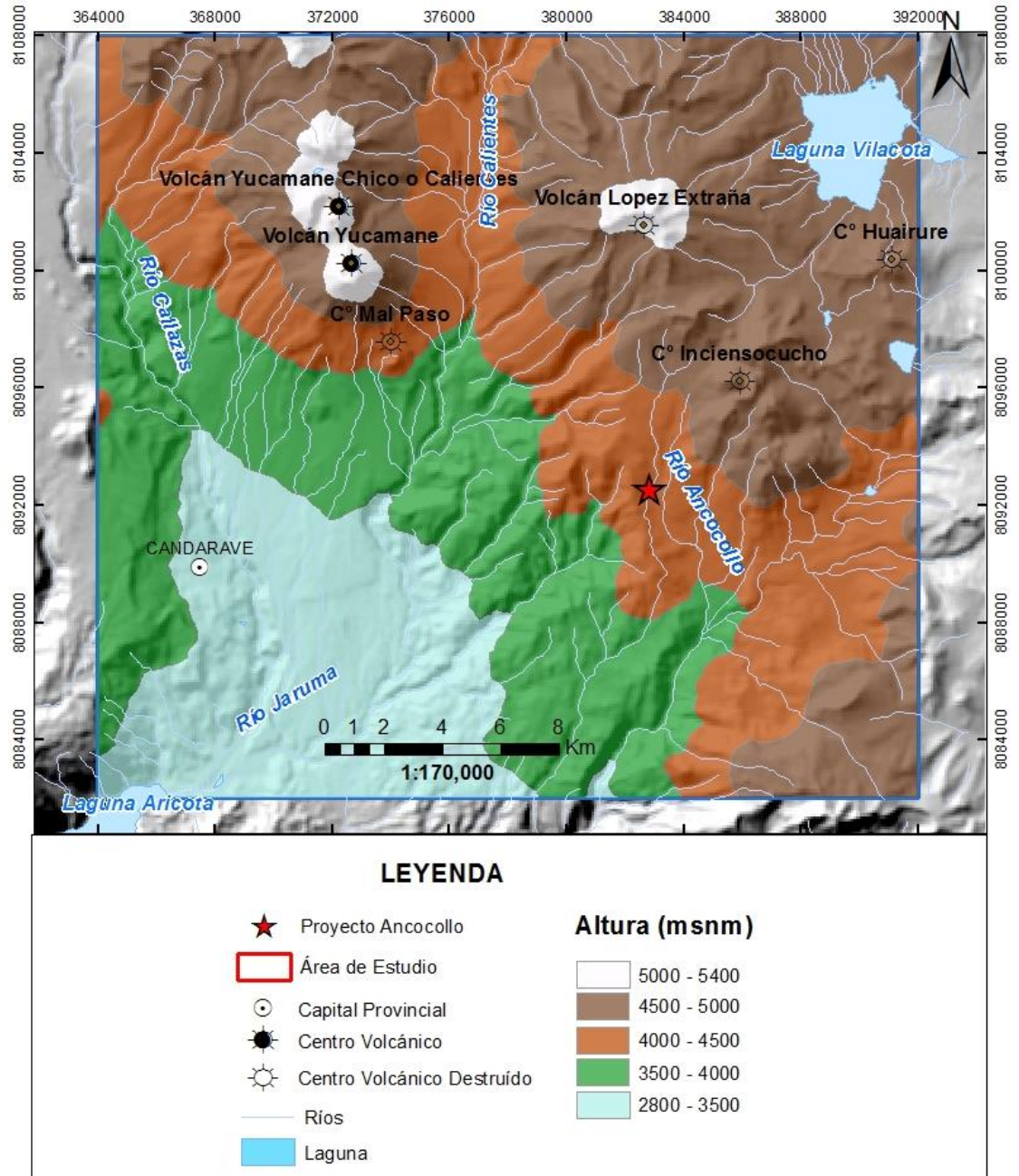
APÉNDICE
Caso de aplicación PERÚ

MAPA DE UBICACIÓN Y ACCESOS

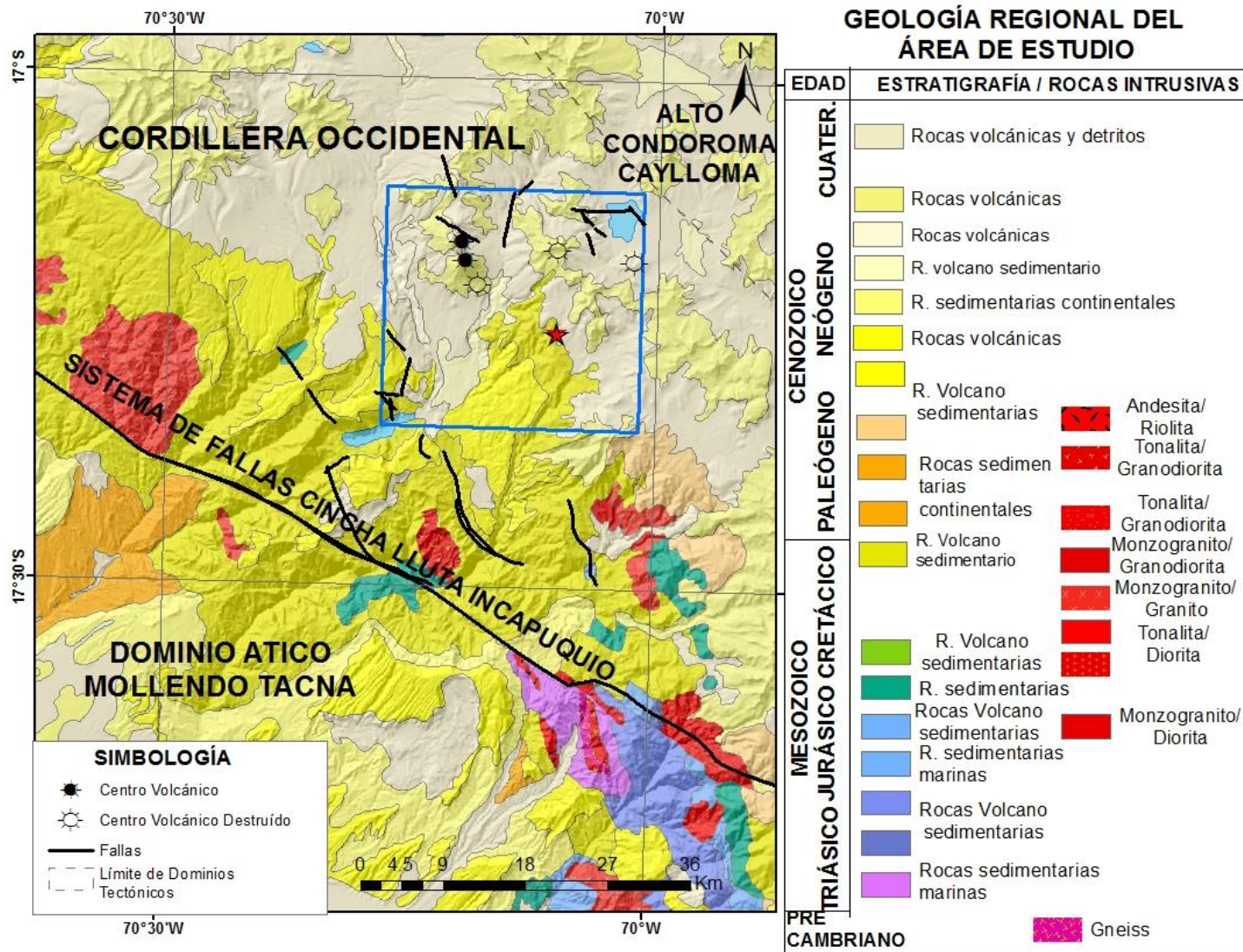


Apéndice 14

Mapa de altitudes e hidrografía

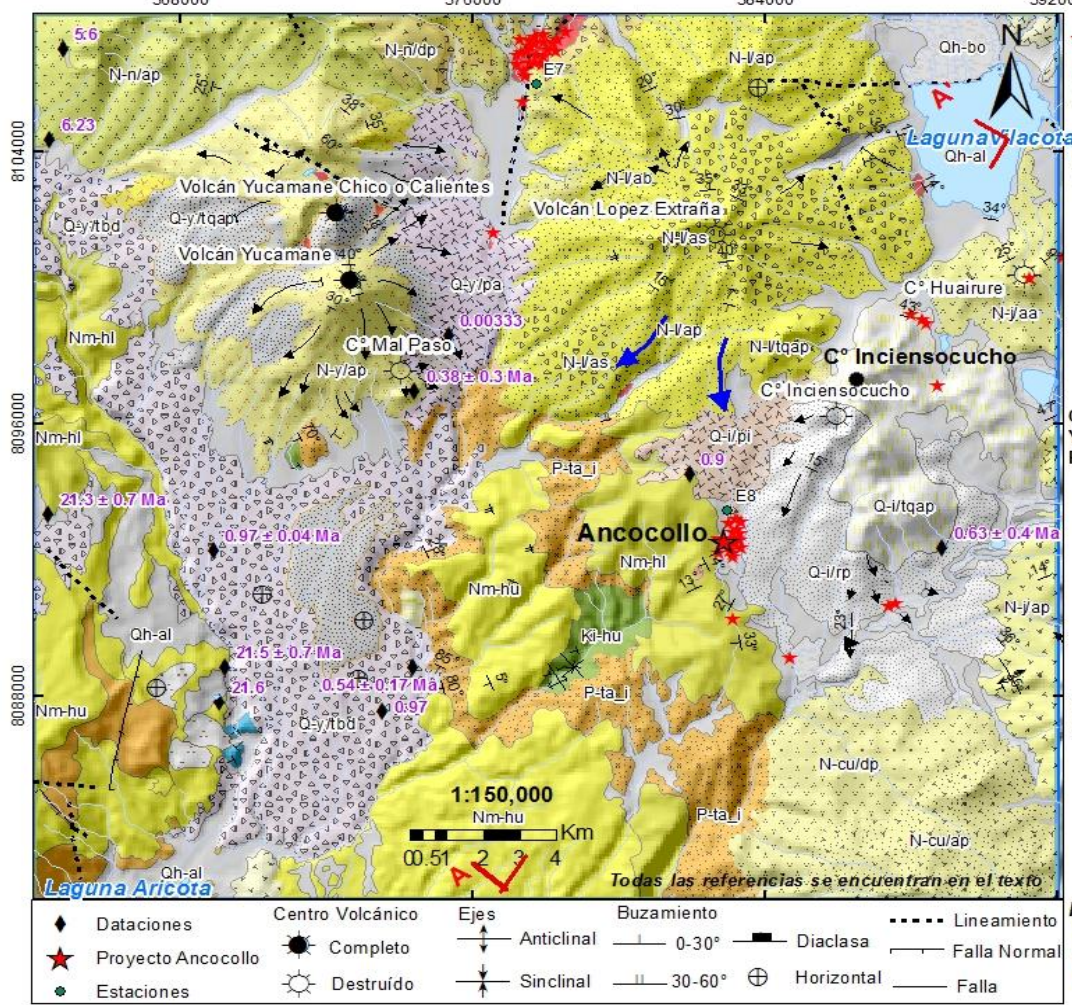


Apéndice 15



Apéndice 16

MAPA GEOLÓGICO DEL PROYECTO ANCOLLO

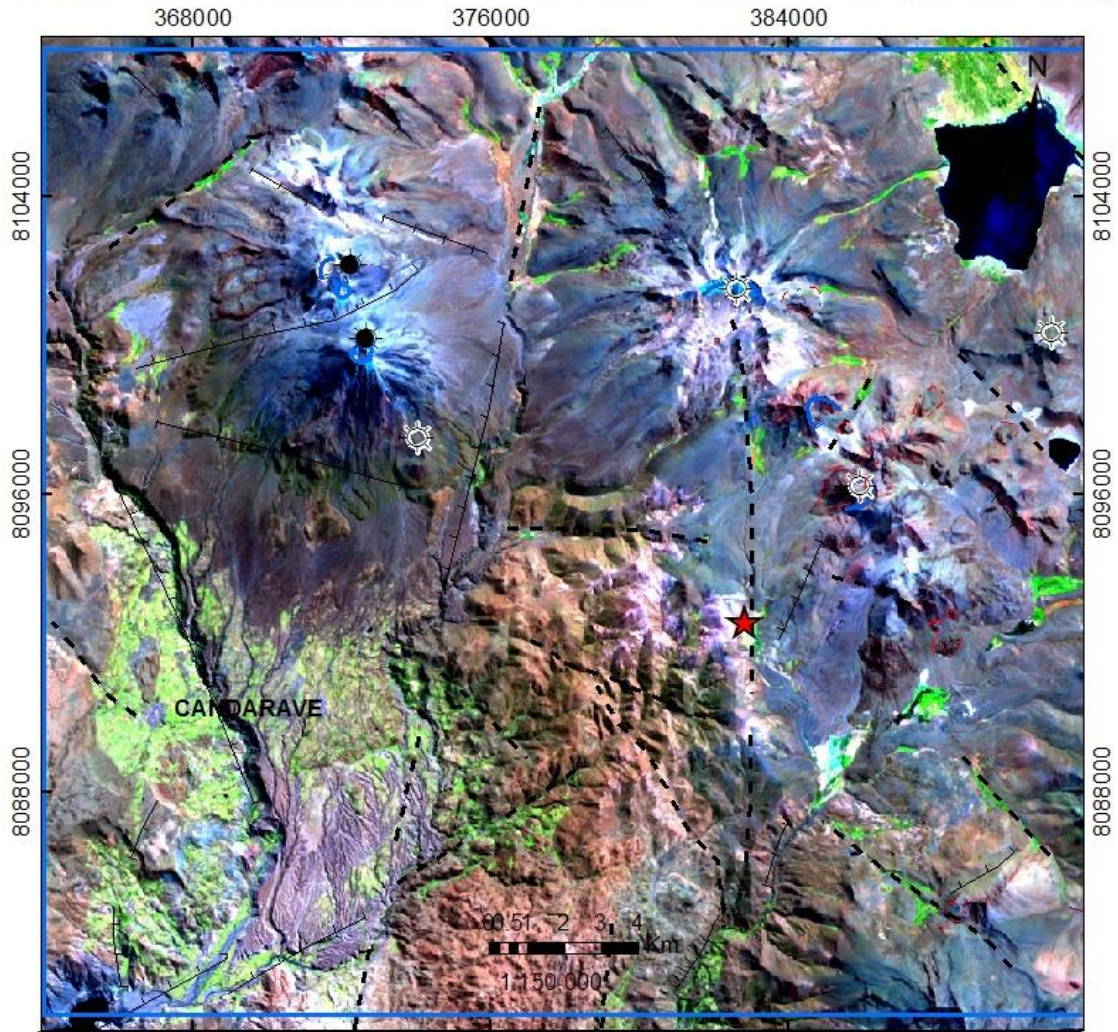


LEYENDA

- ★ **Manifestaciones Termales**
- Depósitos del Cuaternario- Holoceno:
(fluvioglacial, morrena, eólica, coluvial, bofedales, aluvial)
- Q-fg Qpl-mb Qh-e Qh-cd Qh-bo Qh-al
- Depósitos volcánicos del Plioceno y Cuaternario:
(Asociado a Centro Volcánico)
- Yucamane Inciensocucho
- Q-y/dep Q-i/tqap
- Q-y/ap Q-i/rp
- Q-y/pa Q-i/rpi
- Q-y/aa
- Q-y/tqap
- Q-y/ab
- Q-y/tbd
- Cumaile Caycol Lopez Jaruma
- Yanacachi Nazaparco Extraña Jaruma
- Poliailla Ichurasi Ichurasi
- N-cu/ap N-bay/as N-i/tqap N-y/tba
- N-cu/dp N-n/dp N-l/rp N-y/dp N-j/rdp
- N-p/rdp N-n/ter N-l/as N-y/ap N-j/aa
- N-h/pi N-l/ap N-y/rp N-j/ap
- N-n/ci N-l/ab
- N-n/ap N-l/tbka
- Depósitos volcánicos del Paleógeno y Neógeno:
- Rocas intrusivas del Neógeno:
- N-ca Fm. Capillune
- Nm-hu Fm. Huaylillas
- Nm-hi Fm. Huilacollo
- P-ta_i Fm. Tantaré
- N-di Diorita
- KsP-sa/tb Gpo. Toquepala
- Rocas sedimentarias del Jurásico y Cretácico:
- Ki-hu Formación Hualhuani (Areniscas, limolitas)
- Js-la Formación Labra, Grupo Yura (Lutitas, areniscas)

Apéndice 17

MAPA DE INTERPRETACIÓN GEOLÓGICO ESTRUCTURAL (LANDSAT 8)

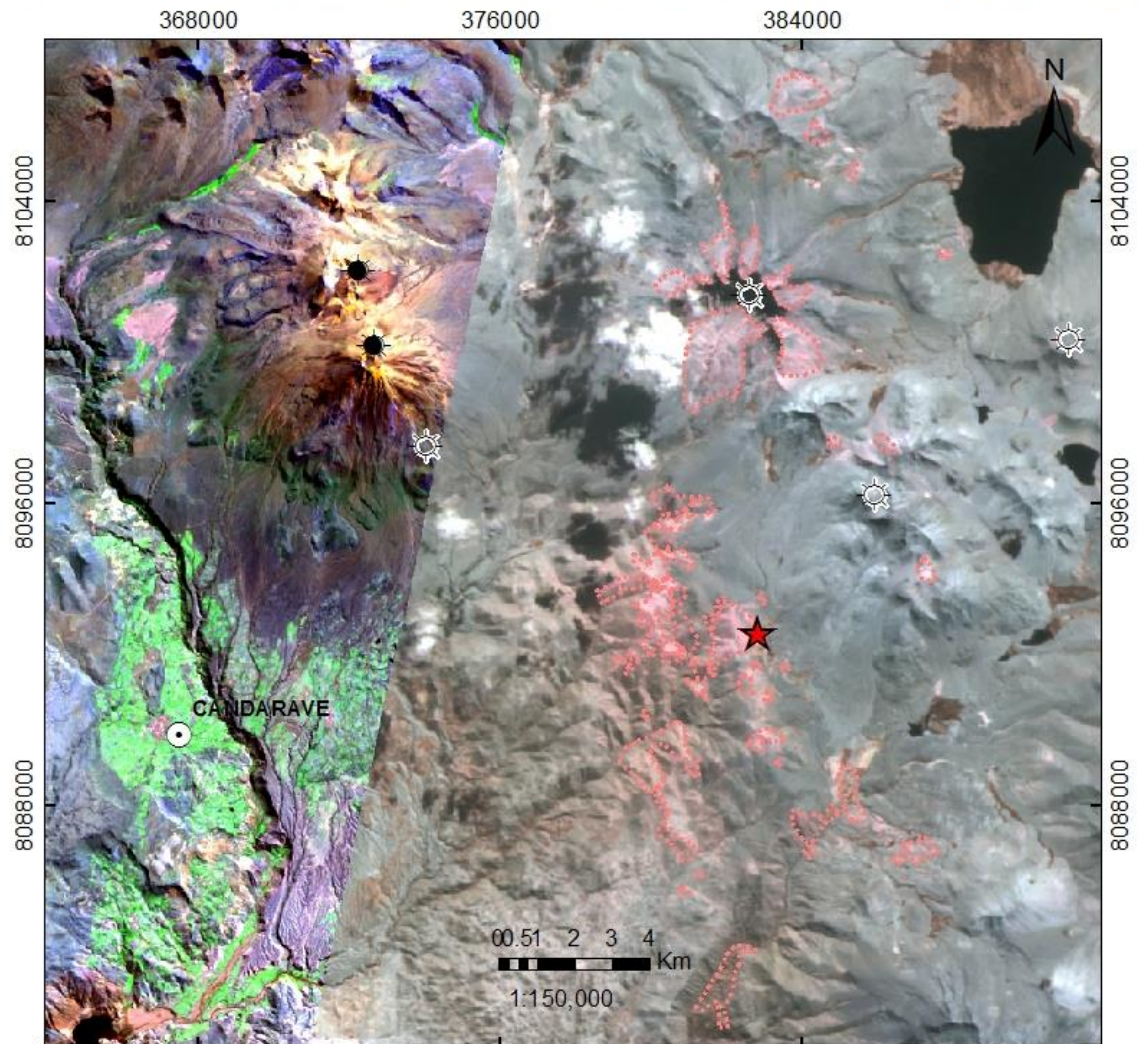


LEYENDA

- | | |
|------------------------------|--|
| ★ Proyecto Ancocollo | ▭ Rasgos litológicos identificados |
| ☀ Centro Volcánico | Lineamientos estructurales interpretados |
| ☀ Centro Volcánico Destruído | - - - Lineamiento |
| ⊙ Capital de provincia | → Zona de colapso |
| Landsat 8: B_753 | → Zona de cráter |
| | — Escarpe |

Apéndice 18

MAPA DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL (LANDSAT 8 Y ASTER)

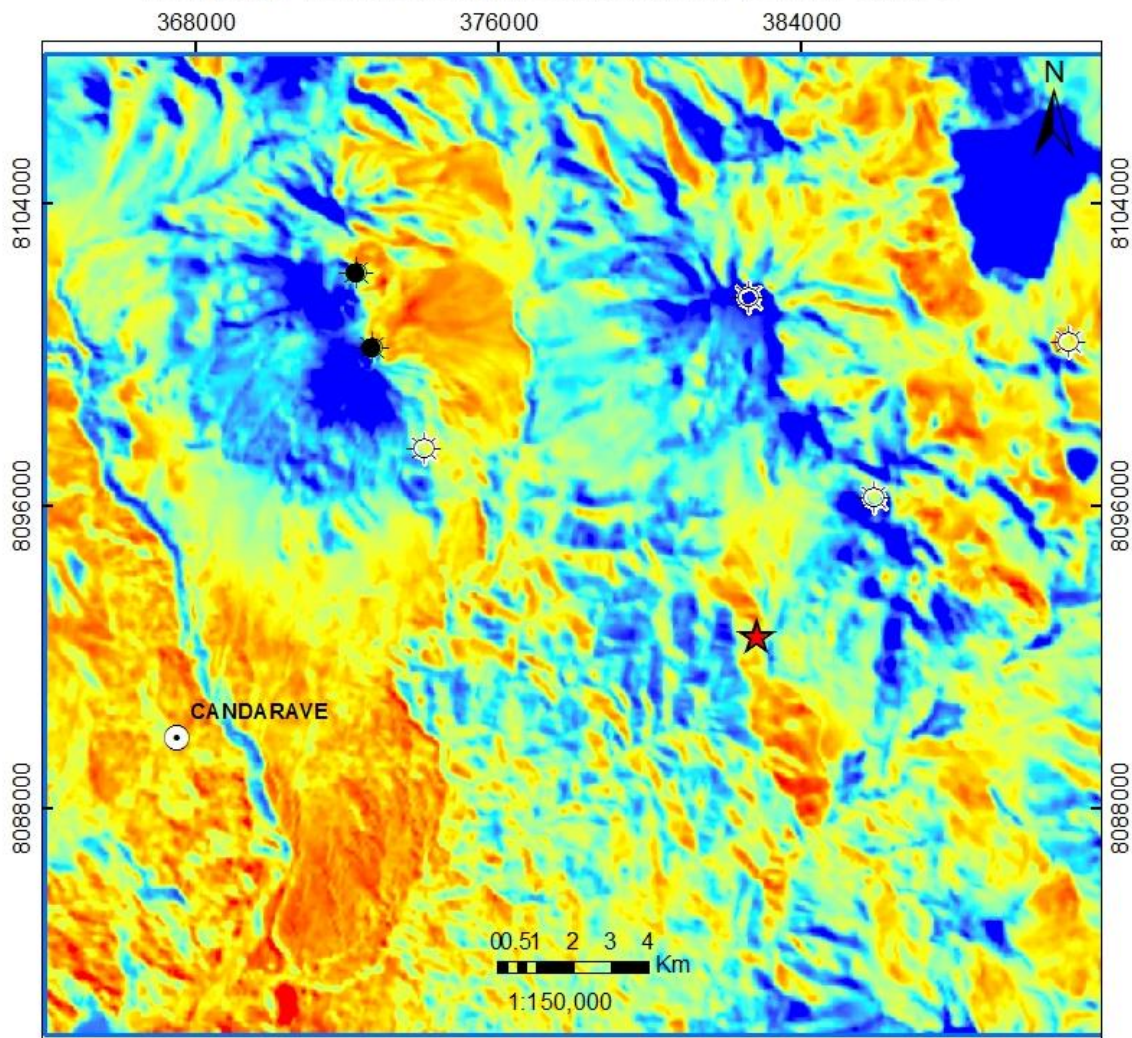


LEYENDA

- | | |
|------------------------------|---|
| ★ Proyecto Ancocollo | ▭ Zonas de alteración hidrotermal
identificación en Imagen Aster |
| ☀ Centro Volcánico | |
| ☀ Centro Volcánico Destruído | |
| ○ Capital de provincia | Landsat: B_357
Aster: B_468 |

Apéndice 19

MAPA DE TEMPERATURAS APARENTES LANDSAT 8

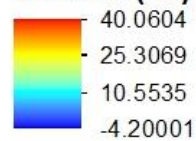


LEYENDA

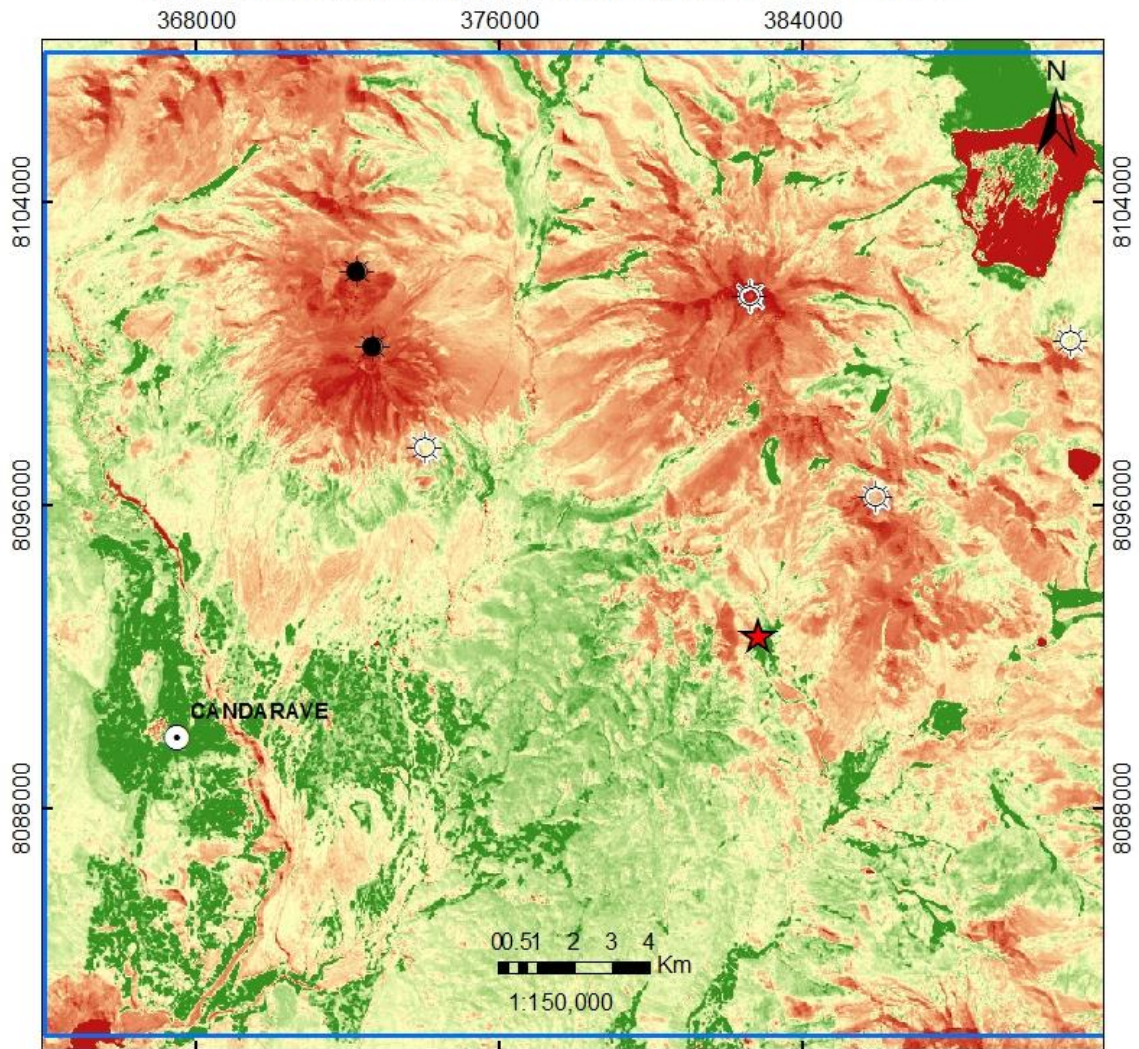
- ★ Proyecto Ancocollo
- Centro Volcánico
- Centro Volcánico Destruído
- Capital de provincia

Temperatura Aparente

Valores (°C)



MAPA INDICE DE VEGETACIÓN IMAGEN LANDSAT 8



LEYENDA

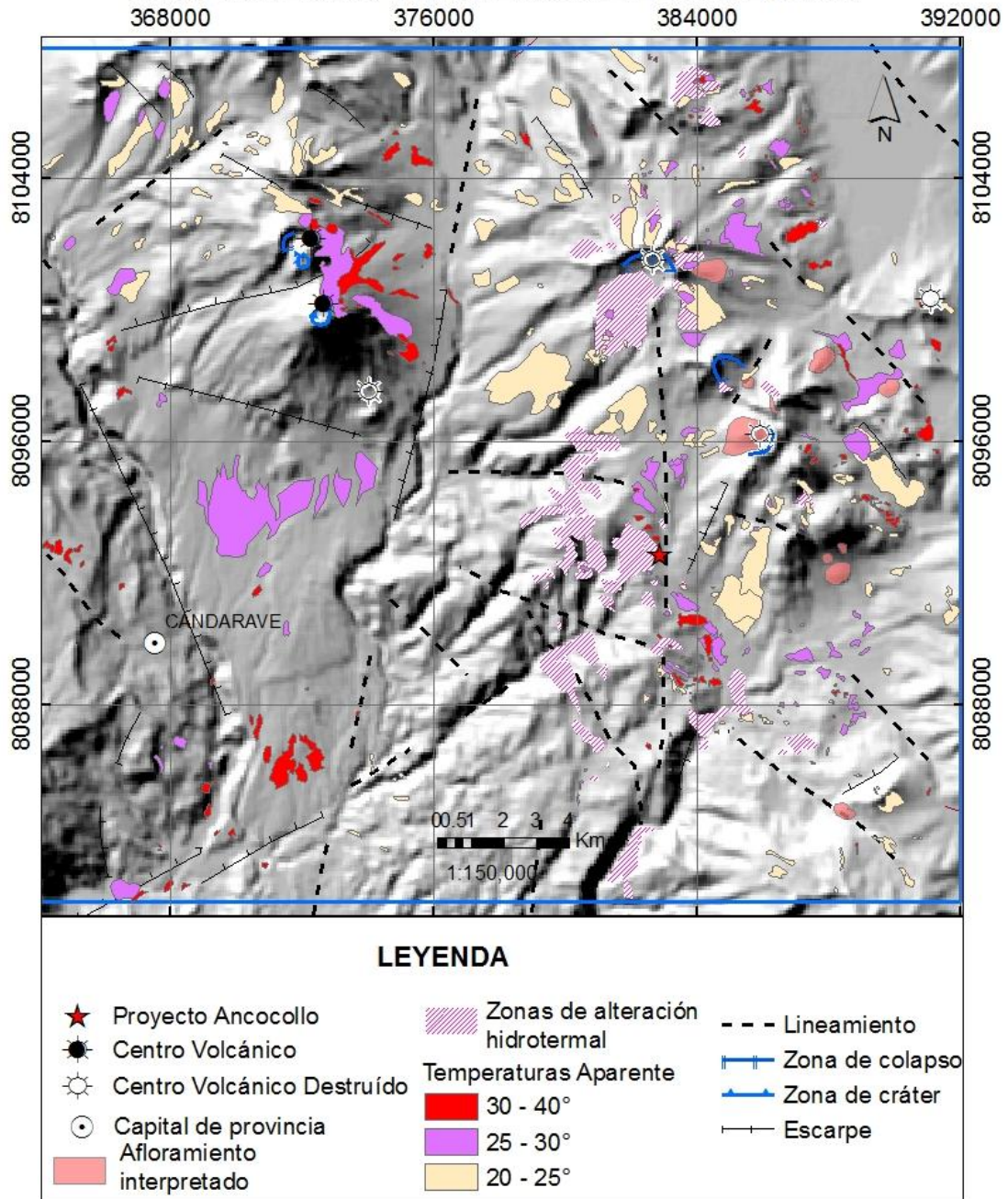
- ★ Proyecto Ancocollo
- Centro Volcánico
- ☼ Centro Volcánico Destruído
- ⊙ Capital de provincia

Valores

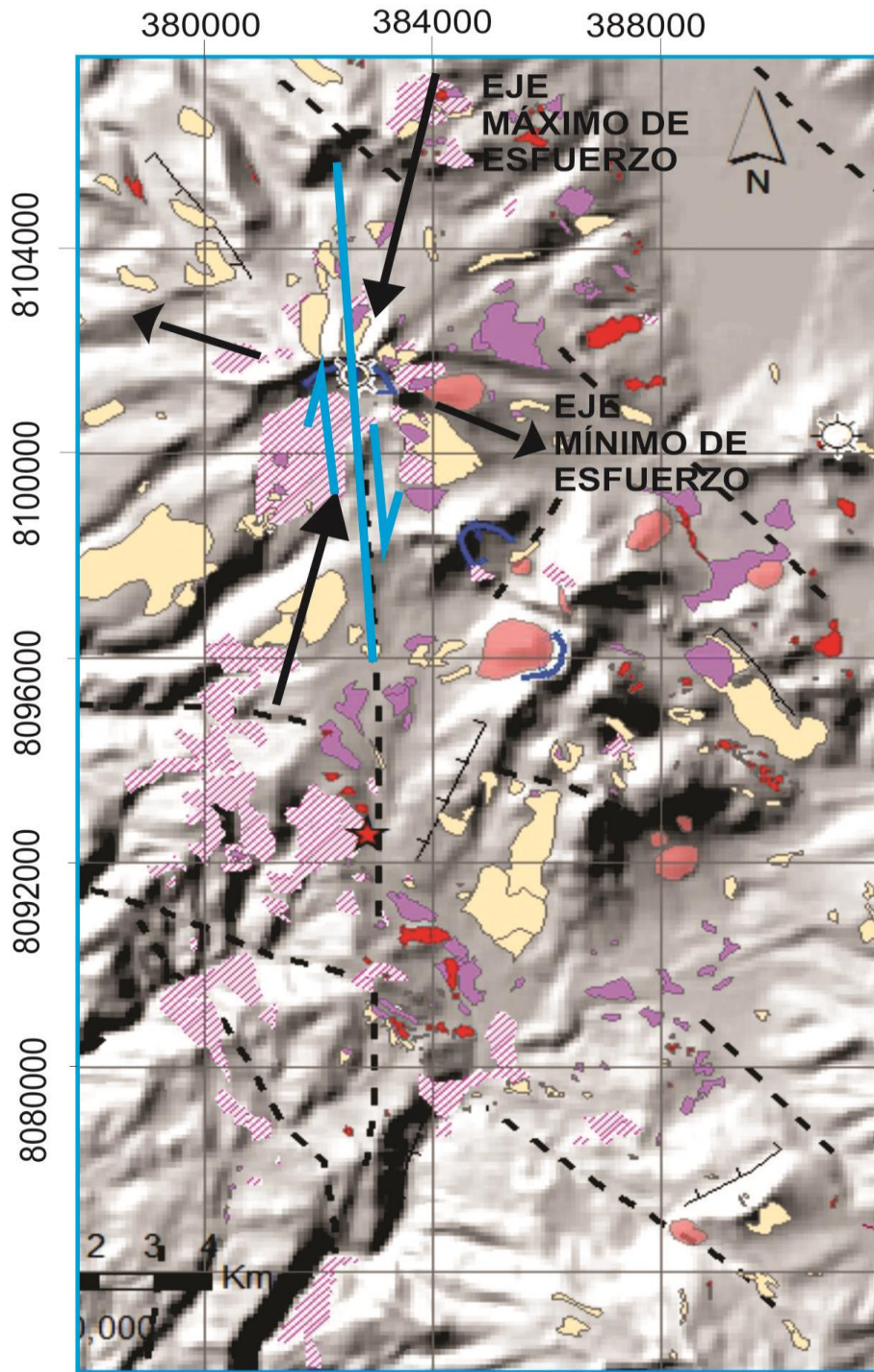


Apéndice 21

MAPA CON DATOS DE ANÁLISIS DE TELEDETECCIÓN

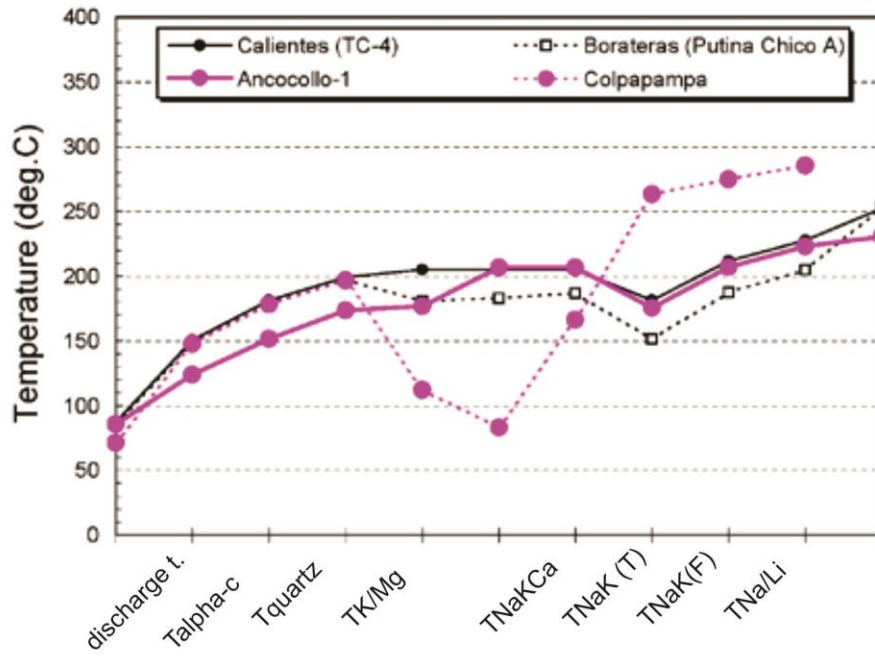


Apéndice 22

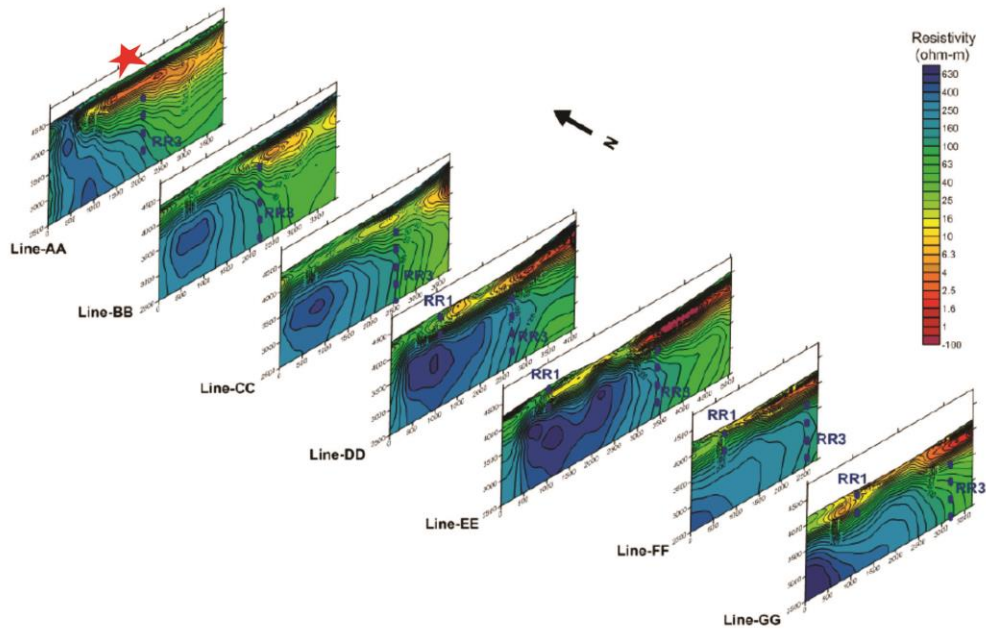


Apéndice 23 Nueva delimitación de área de estudio de Ancocollo

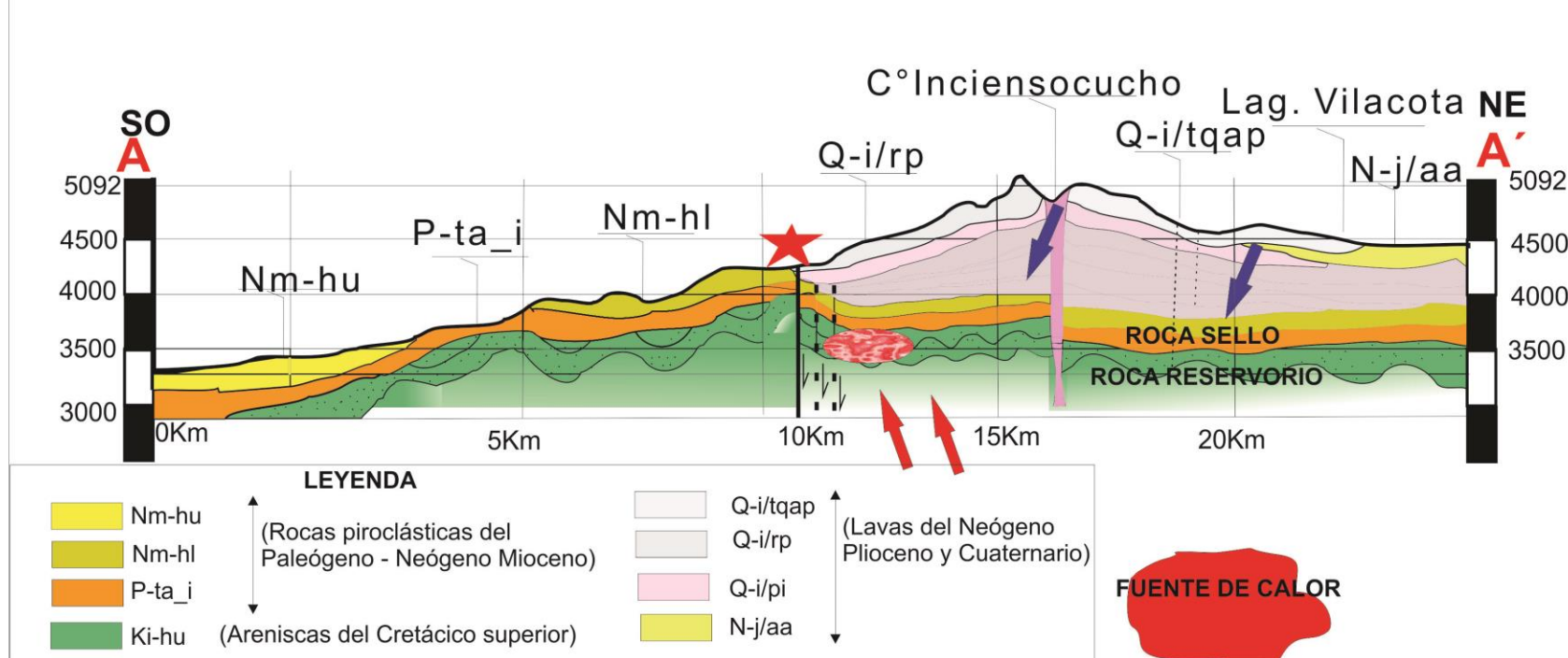
GEOQUÍMICA: Resultado de T° con geotermómetros



GEOFÍSICA: Secciones de resistividad



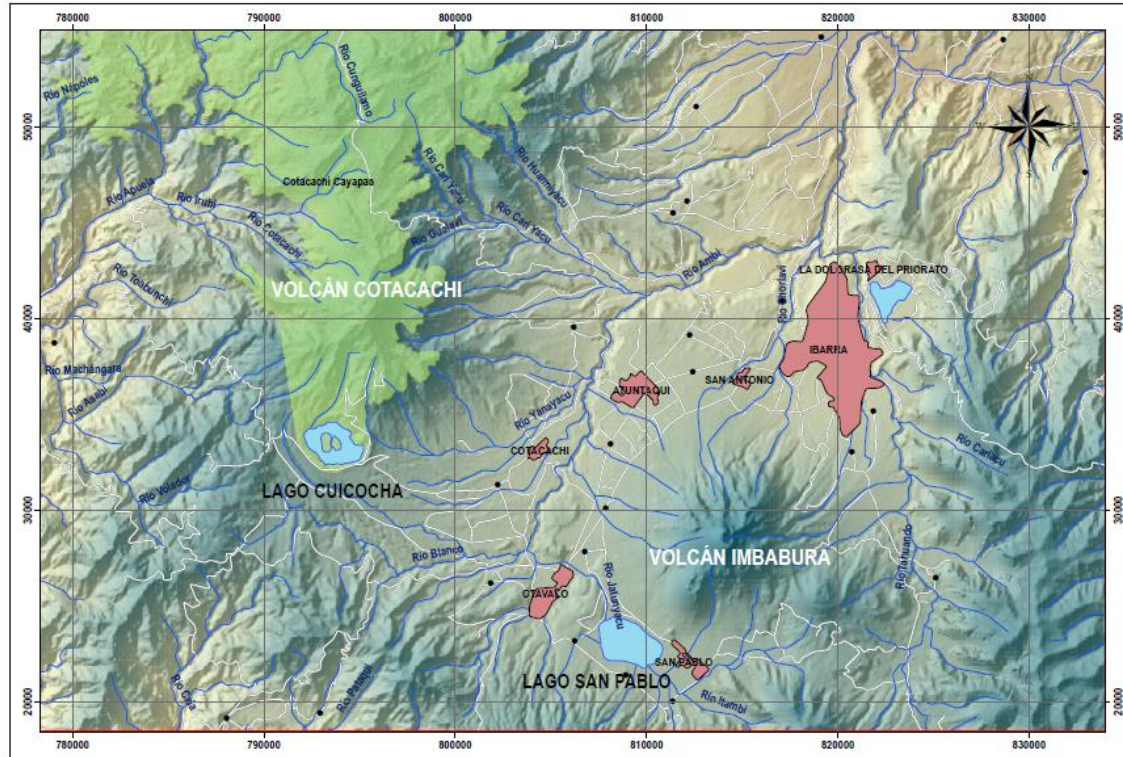
SECCIÓN GEOLÓGICA ANCOCOLLO A-A'





Apéndice 25. Modelo Geológico Conceptual de Ancocollo Perú.

APÉNDICE
Caso de aplicación ECUADOR

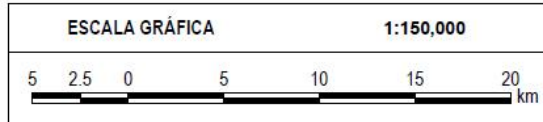
MAPA DE UBICACIÓN



LEYENDA

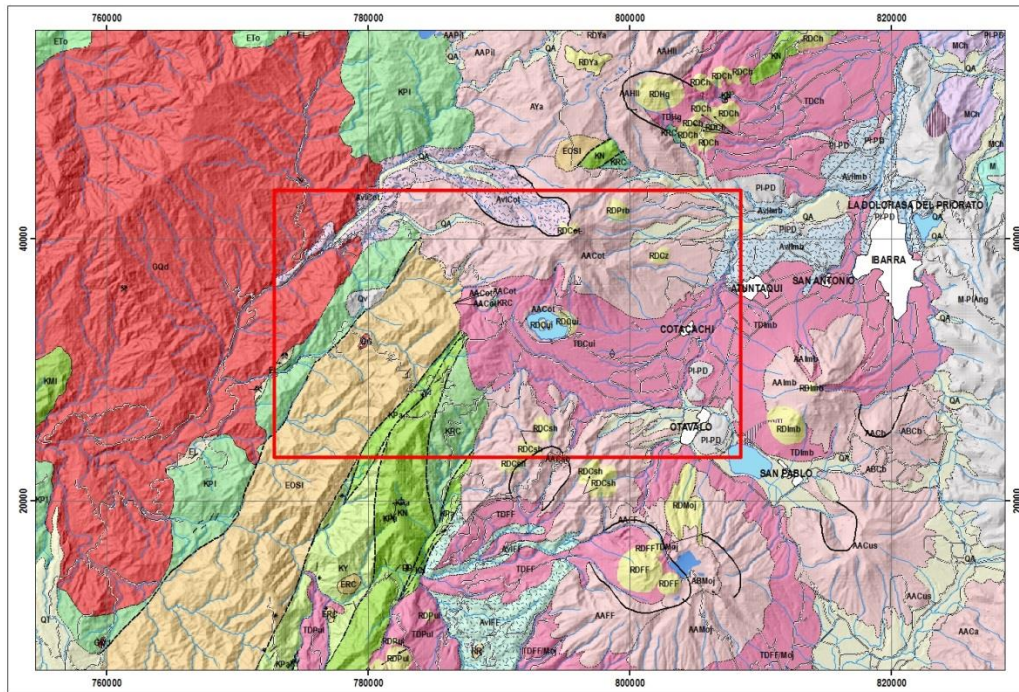
-  Reserva natural
-  Zona urbana
-  Lago - laguna
-  Ríos
-  Vías
-  Poblado

Ubicación: Provincial Imbabura
 Elaborado por: Danilo Asimbaya
 FUENTE DE INFORMACION BASE
 Información Cartográfica base generada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) - Ecuador
 Reservas Naturales generada por el Ministerio del Ambiente
 PROYECCION UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 Datum Horizontal WGS-84 / Zona 17norte
 Datum Vertical Nivel Medio del Mar



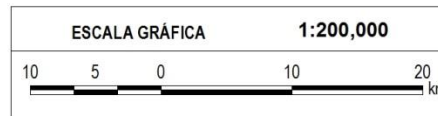
Apéndice 26

MAPA GEOLÓGICO REGIONAL



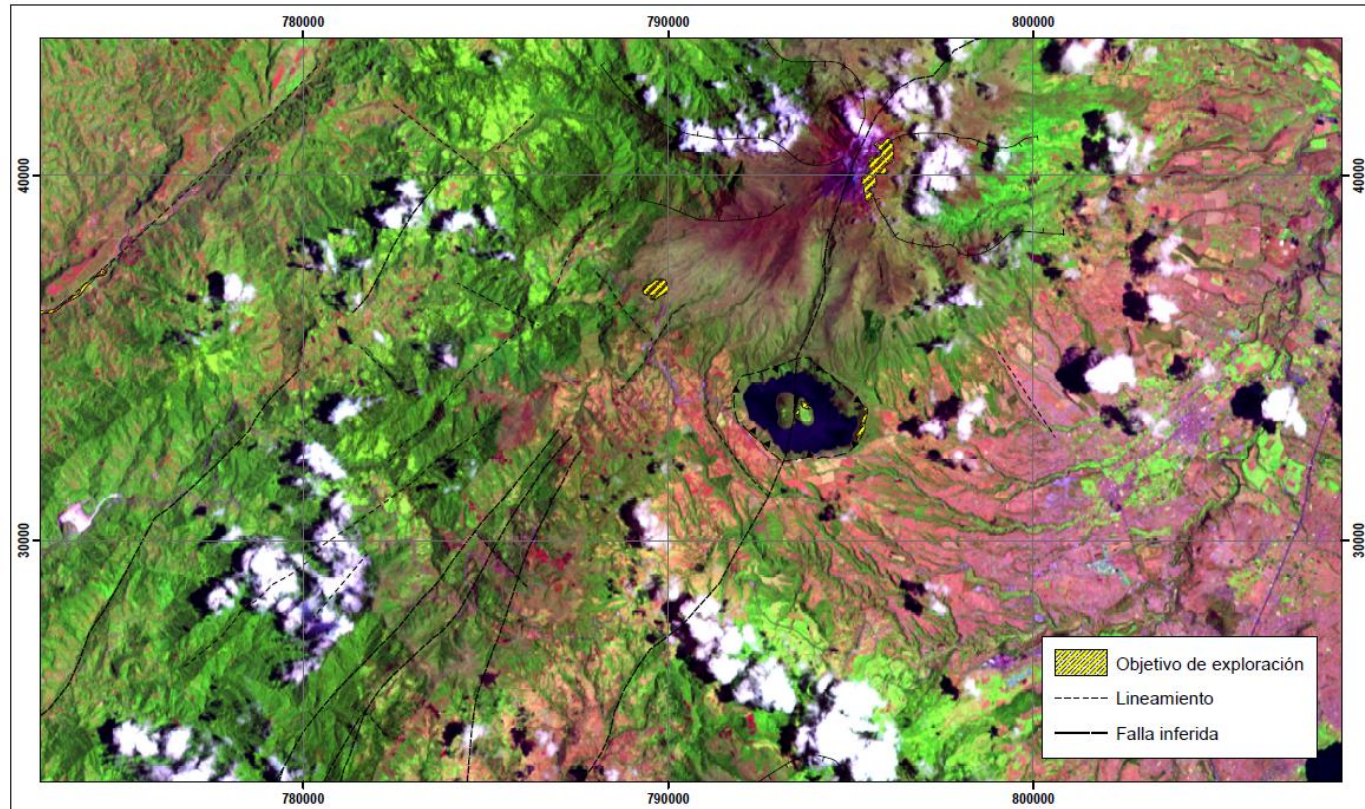
LITOLOGIA	
	Zona derrumbada
	QT Depósito de terraza; aluvial y lahares
	QA Depósito aluvial
	AvImb Depósitos de avalancha Imbabura
	AvCot Depósitos de avalancha Cotacachi
	RD Dacita
	R Roca intrusiva Riolita
	TD Toba dacítica
	AA Andesitas
	Qv Depósito volcánico indiferenciado
	M-PIPn Volcánicos de Pugarán
	M-PIAng Volcánicos del Angochagua
	M-Pivol Secuencias volcánicas Miocénicas Holocénicas
	MCh Formación Chota
	Roca intrusiva
	EL Formación El Laurel
	ERC Formación Rumicruz
	EOSI Formación Silante
	KY Unidad Yunguilla
	KRC Formación Río Cala
	KN Formación Natividad
	KPI Formación Pilatón
	KPMI Formación Mulaute
	KPL Formación La Portada
	KPa Formación Pallatanga
	KNa Unidad Naranjal
	Rocas Metamórficas

FUENTE DE INFORMACIÓN BASE
 Información Cartográfica base generada por el Instituto Geográfico Militar (IGM) - Ecuador
 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 Datum Horizontal WGS-84 / Zona 17norte
 Datum Vertical Nivel Medio del Mar
 FUENTE DE INFORMACIÓN TEMÁTICA
 Unidad Geológica: INIGEM - Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0°-1°N, 1:200 000. MP. Bolanda, L.F. Pitalas, C.E. Ibañango, W.J. McCourt, J.A. Aspden, R.A. Hughes, B. Beate

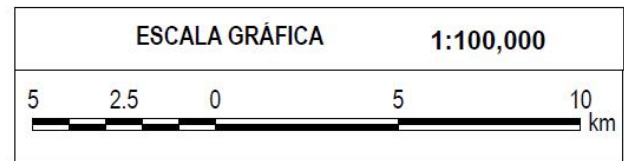


Apéndice 27

MAPA DE LINEAMIENTOS

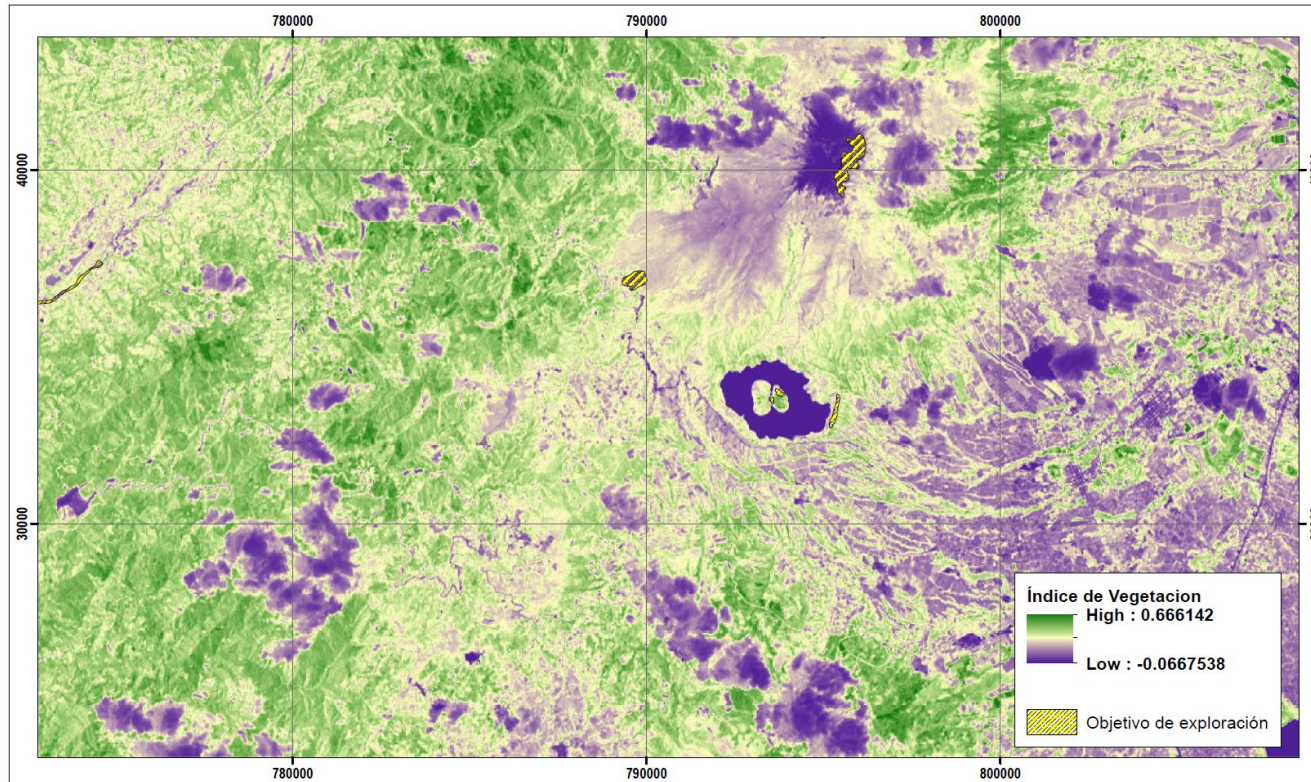


Ubicación: Provincia de Imbabura
 Elaborado por: Danilo Asimbaya
 FUENTE DE INFORMACIÓN BASE
 Imagen satelital cortesía de U.S. Geological Survey
 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 Datúm Horizontal WGS-84 / Zona 17norte
 Datúm Vertical Nivel Medio del Mar.

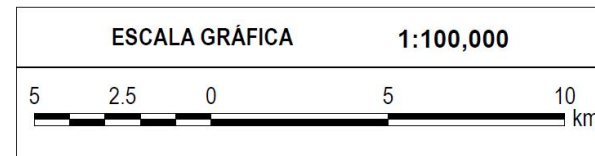


Apéndice 28

MAPA ÍNDICE DE VEGETACIÓN

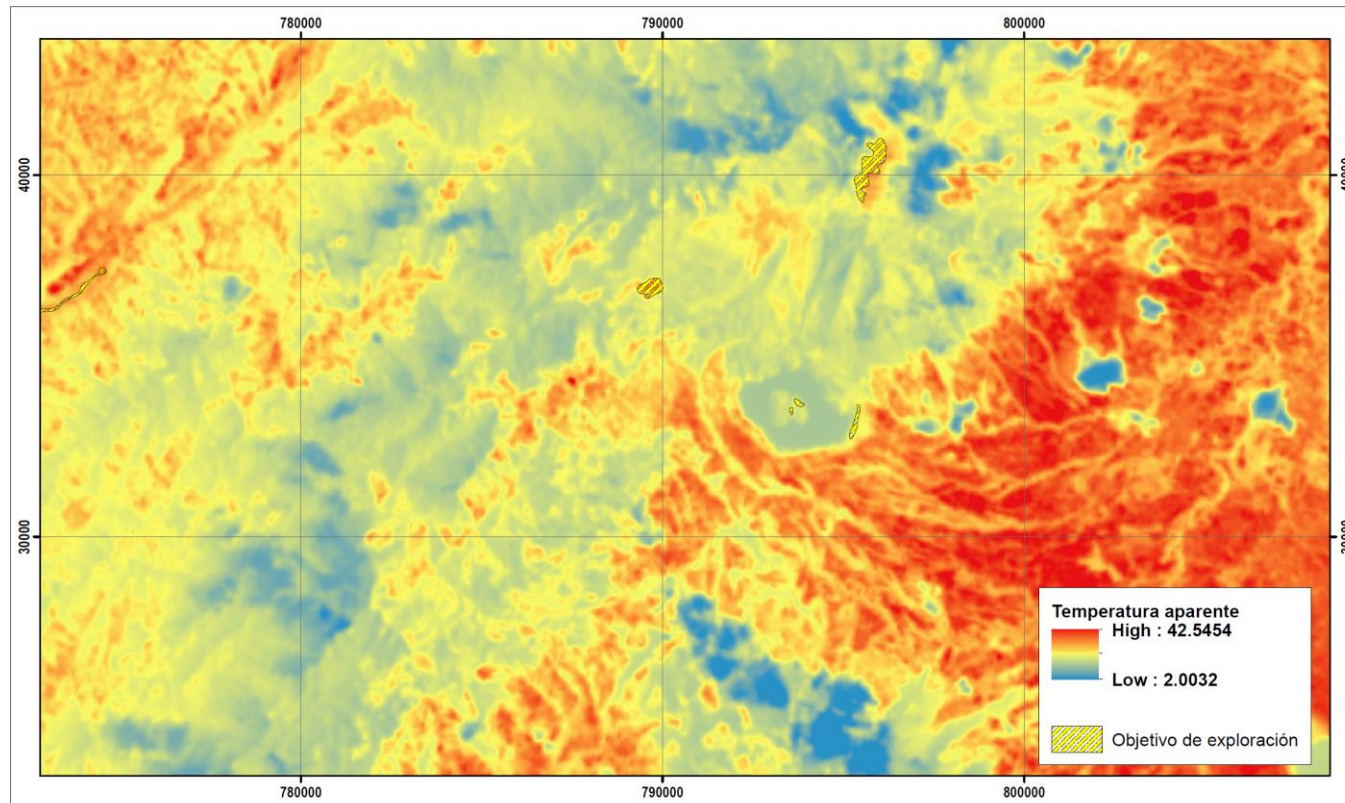


Ubicación: Provincia de Imbabura
 Elaborado por: Danilo Asimbaya
 FUENTE DE INFORMACIÓN BASE
 Imagen satelital cortesía de U.S. Geological Survey
 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 Datúm Horizontal WGS-84 / Zona 17norte
 Datúm Vertical Nivel Medio del Mar.

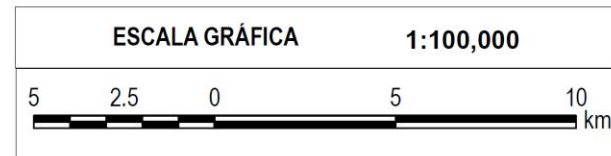
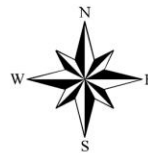


Apéndice 29

MAPA DE TEMPERATURA APARENTE

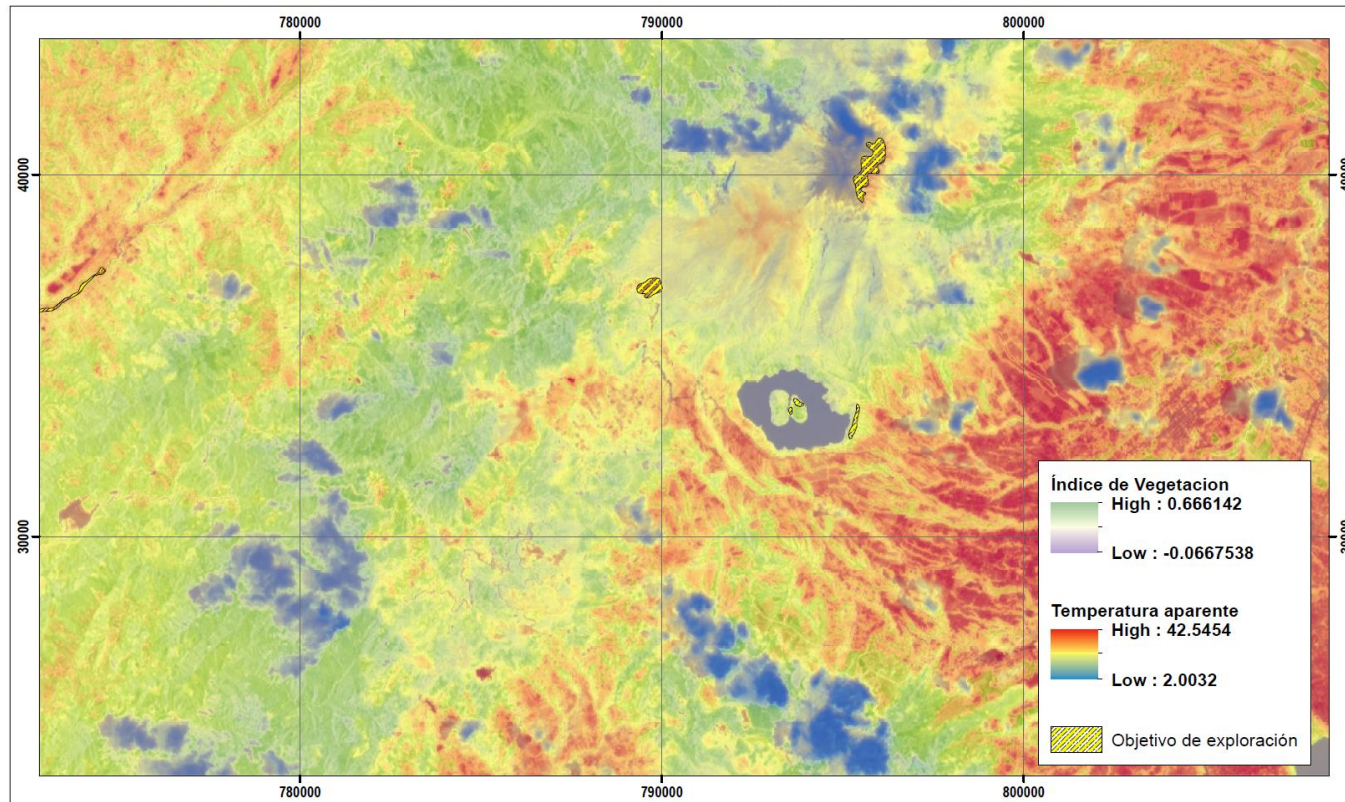


Ubicación: Provincia de Imbabura
 Elaborado por: Danilo Asimbaya
 FUENTE DE INFORMACIÓN BASE
 Imagen satelital cortesía de U.S. Geological Survey
 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 Datúm Horizontal WGS-84 / Zona 17norte
 Datúm Vertical Nivel Medio del Mar.

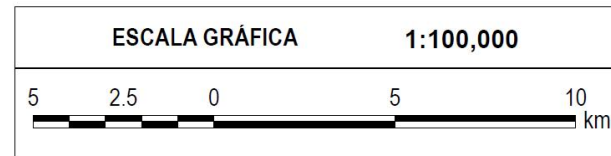
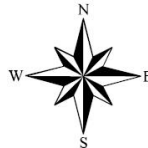


Apéndice 30

MAPA DE VEGETACIÓN- TEMP. APARENTE



Ubicación: Provincia de Imbabura
 Elaborado por: Danilo Asimbaya
 FUENTE DE INFORMACIÓN BASE
 Imagen satelital cortesía de U.S. Geological Survey
 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 Datúm Horizontal WGS-84 / Zona 17norte
 Datúm Vertical Nivel Medio del Mar.

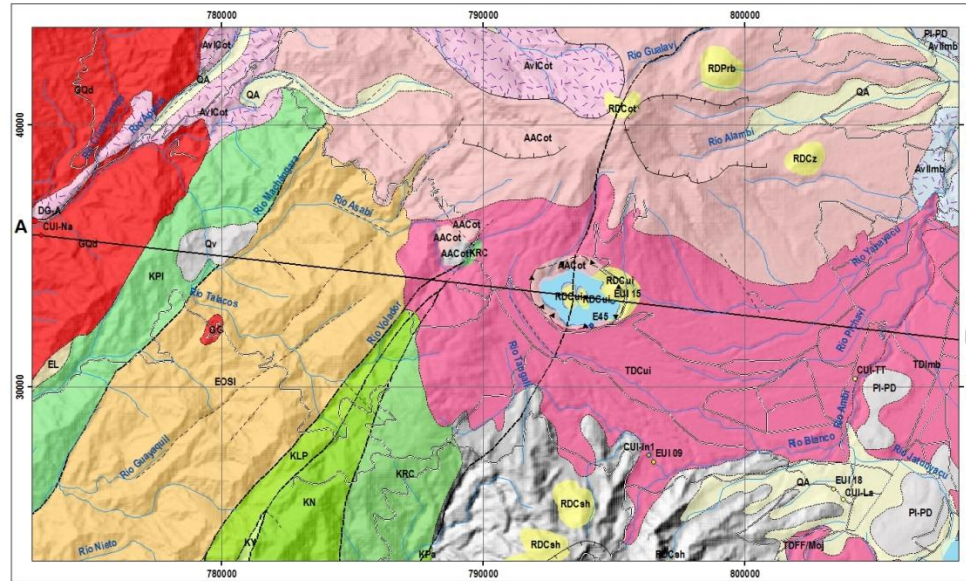


Apéndice 31

Nombre de la muestra	Fecha	Código	UTM este	UTM north	Elevation	Temp C	pH	Li	Na	K	Ca	Mg	SiO2	B	Cl	F	SO4	HCO3	NH4	As	Fe	Mn	Cond umhos/cm	del ¹⁸ O	del D	Tritio
INAMHI Na	2012-10-04	CUI-Na	773106	10035814	2604	47.6	7.7		644.4	12.83	249.24	19.51	58.77		1091.86		655	74.38	0.184		0.063	0.04	4330			
INAMHI La	2012-10-05	CUI-La	803768	10025719	2595	21	6.4		23.54	5.5	25.73	31.22	92.13		11.91		7.2	221.28	0.205		0.3	0.04	464			
INAMHI In1	2012-10-06	CUI-In1	796334	10027408	2664	25	7		148.6	14.23	152.76	248.81	112.7		148.89		33.2	1385.32	0.765		5.036	0.052	2800			
INAMHI TT	2012-10-07	CUI-TT	804203	10030340	2427	22	6.7		3.41	2.15	72.36	156.11	104.9		11.91		18	836.77	1.585		4.518	0.04	1570			
IAEA EUI 08	1987-12-08	EUI 08			2570	25.7	7.2		140	14.4	11.3	150	112	3.4	77.1		6.1	970	0.4					-10.58	-76.3	
IAEA EUI 09	1987-12-08	EUI 09			2600	25.5	7.3		764	29.6	3	205	120	20.6	529		41.8	2156.1	0.1					-7.91	-66.1	0.2
IAEA EUI 14	1987-12-10	EUI 14			2240	18.9	7		32.1	1.7	30.3	17.8	79.1	0.1	5.5		3	227.2	0.1					-10.89	-79.2	0.4
IAEA EUI 15	1987-12-11	EUI 15			3064	14							38	5	67									-6.07	-57.9	2.1
IAEA EUI 16	1987-12-11	EUI 16			2460	19.2	6.6		104	7	47.5	125	103	3.6	67.3		41.2	742.7	0.1					-12.45	-90	
IAEA EUI 17	1987-12-12	EUI 17			2200	22.5	6.4		367	20.4	4.3	267	106	22.7	396		41.7	1672.4	0.1					-11.32	-61.8	
IAEA EUI 18	1987-12-12	EUI 18			2580	19.8	6.7		36.7	5	47.3	29.4	105	1.6	22.1		16.5	265.1	0.1					-8.97	-71.4	0.4
Inguaggiato	2009-02-27	E45	794121.9	10032365	3070	16.3	8.04	0.126	70.84	5.865	102.8	75.36			139.515	0.437	319.68	427.112					777			
DeGrays DG-A	1970	DG-A	772867	10036374		52	6.2	1.9	552	11	255	3	15	9	780		641	27								
Gunkel GWS1	2004-2010	GWS1	Lago	Lago	3072			0.113	61.7	5.4	47.4	32		4.3	69.4		13.8	240		0.003	0.028	0.021				
Gunkel GWS2	2004-2010	GWS2	Lago	Lago	3072			0.112	61.7	5.7	43.5	30.5		4.1	72		12.5	341		0.006	0.025	0.006				
Gunkel Gcasc	2004-2010	Gcasc	Lago	Lago	3072		7.9	0.017	10.2	1.3	18.5	4		0.03	3.2		9.7	69.1		0.003	0.144	0.01	259			
Gunkel Gyerovi	2004-2010	Gyer	Lago	Lago	3072	25.2	6.2	0.33	247	14.4	120	70.2		5.6	171		193	420		0.243	7.4	0.22	2931			
Gunkel verti fria	2004-2010	Gvria	Lago	Lago	3400	17.3	8.3		4.598	0.00168	53.264	0.924					0.865				0.104	0.0098	967			

Apéndice 32

MODELO GEOLÓGICO



Ubicación: Provincia de Imbabura
 Elaborado por: Danilo Alambra
 PROYECCIÓN UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 Datum Horizontal WGS 84 / Zona 17norte
 Datum Vertical Nivel Medio del Mar
 FUENTE DE INFORMACIÓN TEMÁTICA:
 Unidad Geológica INGEMM - M.P. Bolanda,
 L.F. Plazaiz, G.E. Badoego, W.J. McCourt, J.A.
 Aspöden, R.A. Hugues, B. Beate. 2000. Mapa Geológico
 de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0°-1°N, 1:200 000.
 Vallejo, C. 2007. Evolution of the Western Cordillera
 in the Andes of Ecuador (Late Cretaceous-Paleogene)
 [Ph.D. thesis], Zürich, Switzerland, Institute of Geology.



Apéndice 33