

## PROGRAMA REGIONAL DE ENTRENAMIENTO GEOTÉRMICO (PREG)

Diplomado de especialización en geotermia-2015

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

**LaGeo**



**“INTEGRACIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS Y GEOQUÍMICOS DE UN ÁREA GEOTERMAL, CASO DE ESTUDIO COLCA-PERÚ”**

**Presentado por:**

Jose Carlos Farfán Meza  
Cesar De La Cruz Poma  
Noel Reynaldo López Morales

**Tutores:**

Lic. Elizabeth de Henríquez. & Ing. Antonio Buenaventura Matus

San Salvador 30 de octubre del 2015

## **RESUMEN**

El área de estudio se localiza en la Cordillera Occidental de los Andes del sur del territorio peruano, en la región Arequipa y provincia de Caylloma, Hidrográficamente se ubica en gran parte en la cuenca de los ríos Camana-Majes-Colca, cuya dirección preferencial del curso del río es de Oeste-Este. De acuerdo al mapa de Regiones Geotermiales, el área de estudio se ubica en la Región Eje Volcánico Sur, zona promisorio para el desarrollo de la geotermia de alta entalpia, asimismo el termalismo esta relacionando principalmente al complejo volcánico denominada Ampato-Sabancaya (CVAS).

Los rasgos geomorfológicos el área de estudio presenta unidades de origen volcánico y glaciario. Las áreas de baja pendiente favorecen la infiltración de las aguas superficiales.

El basamento está conformado por el Complejo Camana-Majes- Colca, el mismo que infrayase en discordancia angular a la secuencia sedimentaria del Grupo Yura y suprayase al Grupo Yura los volcánicos del Grupo Tacaza y los volcánicos del Grupo Barroso.

El área de estudio se encuentra limitadas por tres sistemas de fallas importantes, Sistema de fallas NE-SW NW-SE y el sistema activo E-O, este último que limita al sistema geotermal Ampato-Sabancaya-Hualcahualca.

De acuerdo a la caracterización hidrogeológica que ha identificado al Grupo Tacaza como posible reservorio geotérmico por presentar condiciones permeables, que favorecen el almacenamiento y circulación de los fluidos geotérmicos, la capa sello del reservorio posiblemente lo constituyen la Formación Orcopamapa por presentar materiales poco permeables a impermeables.

El estudio geoquímico de las manifestaciones termales, manantiales fríos y diferentes afloramientos acuíferos superficiales presentes en la zona de interés se realizó mediante la aplicación de metodologías de clasificación de agua a través de diagramas químicos que resaltan las características de cada tipo de muestra, obteniendo el resultado de la existencia de muestras de diferente tipo como superficiales, aguas calentadas por vapor, aguas geotérmicas y mezclas de ellas; posteriormente se aplicaron criterios geoquímicos en el uso de diagramas para determinar los orígenes de las aguas encontrando que existen dentro de la gama de muestras cierto grupo de las mismas que presentan un origen distinto al sistema geotérmico de interés en este estudio. Como paso siguiente también se realiza el análisis isotópico de las muestras para observar su comportamiento con respecto a la línea meteórica mundial observándose la existencia de muestras con un shift en oxígeno 18 característico de aguas geotérmicas, utilizando también la isotopía para la determinación de la recarga del sistema; también se realiza el análisis de distribución areal de componentes químicos característicos así como la aplicación de geotermómetros catiónicos, de sílice y mineral para lograr definir las zonas de descarga de los fluidos y la temperatura estimada en el reservorio de alta temperatura así como en el de mediana o baja temperatura, obteniendo con ello los elementos suficientes para la construcción del modelo geoquímico conceptual.

## **CONTENIDO**

RESUMEN .....	2
CAPITULO I ASPECTOS GENERALES .....	9
1.1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.2 ANTECEDENTES .....	9
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO .....	12
1.5 OBJETIVOS .....	13
1.5.1 Objetivo General .....	13
1.5.2 Objetivo específico .....	13
1.6 ALCANCES .....	13
1.7 MARCO TEÓRICO .....	13
1.7.1 Energía geotérmica .....	13
1.7.2 Clasificación según la Temperatura (tomado de Torres et al; 2013).....	14
1.7.3 Fenómenos que pueden indicar áreas geotérmicas. ....	14
1.7.4 Exploración geocientífica .....	14
1.7.5 Modelo conceptual (tomado de Torres et al; 2013) .....	15
1.7.6 Fases de un proyecto geotérmico .....	18
1.8 METODOLOGÍA.....	18
1.8.1 Criterios Geológicos.....	18
1.8.2 Criterios Hidrogeológicos .....	18
1.8.3 Criterios. Geoquímicos.....	19
1.9 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	19
1.9.1 Ubicación y Accesibilidad .....	19
1.9.2 Clima y Vegetación .....	21
CAPITULO II CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO Y GEOLÓGICO .....	22
2.1 GEOMORFOLOGÍA .....	22
2.1.1 Geoformas de origen volcánico.....	22
2.1.2 Geoformas de origen glaciario .....	24
2.2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA GEOTERMAL AMPATO-SABANCAYA- HUALCA HUALCA .....	27
2.2.1 Complejo Majes Colca .....	27
2.2.2 Formación Socosani.....	27
2.2.3 Grupo Yura (+- 1000m) .....	28
Formación Puente.....	28

Formación Cachíos .....	28
Formación Labra .....	29
Formación Gramadal .....	29
Formación Hualhuani .....	29
2.2.4 Formación Murco .....	30
2.2.5 Formación Arcurquina .....	30
2.2.6 Formación Huanca .....	30
2.2.7 Grupo Tacaza (+- 1000 m) .....	30
2.2.8 Grupo Barroso (+/- 1 200 m) .....	31
Complejo Volcánico Mismi .....	32
Estratovolcán Las Minas .....	32
Complejo Volcánico Hualca Hualca .....	32
Estratovolcán Ampato .....	33
Estratovolcán Sabancaya .....	34
2.2.9 Grupo Andahua .....	34
2.2.10 Depósitos fluvioglaciares .....	34
2.2.11 Depósito lacustrinos .....	34
2.2.12 Depósitos Aluviales .....	35
2.2.13 Depósitos Coluviales .....	35
2.2.14 Rocas Intrusivas .....	35
2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL .....	38
2.3.1 Sistemas de fallas de dirección NO-SE .....	38
2.3.2 Sistema de fallas NE-SO trasversales a la cordillera .....	38
2.3.3 Sistema de fallas E - O .....	38
2.4 ALTERACIONES HIDROTERMALES .....	41
CAPITULO III HIDROGEOLOGÍA .....	44
3.1 INTRODUCCIÓN .....	44
3.2. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	44
3.2.1 Determinación in Situ de la Temperatura obtenido en campo. ....	49
3.3 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS .....	49
3.3.1 Porosidad .....	50
3.3.2 Permeabilidad o Conductividad Hidráulica .....	51
3.4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS ...	53
3.4.1 Caracterización Hidrogeológica .....	53

3.4.2 Mapa hidrogeológico de Colca .....	53
3.4.3 Unidades hidrogeológicas .....	56
CAPITULO IV GEOQUÍMICA.....	59
4.1 INTRODUCCIÓN .....	59
4.2 MUESTREO DE AGUAS.....	60
4.3 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS.....	60
4.4 ANÁLISIS DE MEZCLA DE AGUAS.....	64
4.5 ANÁLISIS DEL ORIGEN DE LAS AGUAS.....	66
4.6 GEOQUÍMICA ISOTÓPICA .....	69
4.6.1 Estimación de la recarga del sistema.....	70
4.7 DISTRIBUCIÓN ARIAL DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DE MAYOR RELEVANCIA.....	72
4.8 GEOTERMOMETRÍA.....	75
4.8.1 Geotermómetro de equilibrio mineral .....	79
CAPÍTULO V PRESENTACION DE RESULTADOS .....	81
5.1 MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO PRELIMINAR .....	81
5.2 MODELO CONCEPTUAL GEOQUÍMICO .....	85
5.3 MODELO CONCEPTUAL INTEGRADO.....	86
CONCLUSIONES .....	90
BIBLIOGRAFÍA .....	91

## **Lista de Figuras**

Figura N° 1.1 Mapa de Regiones Geotermiales del Perú y manifestaciones visibles de energía geotérmica en superficie (Vargas & Cruz, 2010).

Figura N° 1.2 Modelo conceptual del sistema geotermal en Tutupaca – Perú, tomado del Plan Maestro, 2010.

Figura N° 1.3 Ubicación de la zona de estudio.

Figura N° 1.4 Zonas volcánicas en los Andes de Sudamérica (ZVN, ZVC, ZVC, ZVA, Norte, Centro, Sur y Austral respectivamente) (Ramos y Alemán, (2000) y Gutscher, (2000).

Figura N° 2.1 Vista desde la localidad Lillipampa del complejo volcánico Ampato Sabancaya y el estratovolcán Hualca Hualca. Tomado de Delgado, R. 2012.

Figura N° 2.2 Vista del flanco oriental del Complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Se observa lavas recientes que presentan superficies rugosas y estructuras angulosas. Al fondo se tiene estrato-cono, conos de la cubre y domos. Foto tomada de Mariño, J 2010.

Figura N° 2.3 Flujos andesíticos intercalados con tobas cristalolíticas, del segundo evento del complejo volcánico Hualca Hualca. Vista al S.

Figura N° 2.4 Columna estratigráfica del área geotermal Sabancaya-Ampato-Hualca Hualca.

Figura N° 2.5 Alteración hidrotermal y manifestaciones fumarólicas. Vista al S de Puye Puye.

Figura 3.1 Fumarola Paclla ubicado en el valle del río Colca sector Pacclla (fotografía tomada del Plan Maestro, 2010).

Figura 3.2 Fumarola Pinchollo en la quebrada Huayuray, y ladera del nevado Hualcahualca (fotografía tomada del Plan Maestro, 2010).

Figura N° 3.3 Isovalores de temperatura superficial.

Figura N° 4.1 Ubicación geográfica de muestras disponibles para zona de estudio.

Figura N° 4.2 Diagrama de Piper para muestras de la zona de estudio.

Figura N° 4.3 Diagrama ternario aniónico para clasificación de aguas.

Figura N4.4 Diagramas de Stiff para muestras representativas.

Figura N° 4.5 Diagrama de Langelier Cloro + Sulfatos.

Figura N° 4.6 Diagrama de Langelier cloruros.

Figura N° 4.7 Diagrama sodio vrs potasio.

Figura N° 4.8 Diagrama cloro vrs boro para todas las muestras.

Figura N° 4.9 Diagrama cloro vrs boro ampliado sin incluir muestra T-08.

Figura N° 4.10 Ubicación de muestras con química de origen distinto.

Figura N° 4.11 Distribución isotópica de muestras con respecto a la línea meteórica global.

Figura N° 4.12 Estimación de la recarga del sistema

Figura N° 4.13 Delimitación de la zona de recarga del sistema.

Figura N° 4.14 Distribución areal de temperaturas de surgencias.

Figura N° 4.15 Distribución areal de cloruros.

Figura N°4.16 Distribución areal de sulfatos.

Figura N° 4.17 Distribución areal de magnesio.

Figura N° 4.18 Geotermómetro gráfico de Giggenbach para la zona de estudio.

Figura N° 4.19 Geotermómetros catiónico para zona de alta temperatura.

Figura N° 4.20 Geotermómetros de cuarzo para zona de alta temperatura.

Figura N° 4.21 Geotermómetros catiónicos para zona de baja temperatura.

Figura N° 4.22 Geotermómetros de cuarzo para zona de baja temperatura.

Figura N° 4.23 Geotermómetro de equilibrio mineral para muestra de Paclla.

Figura N°4.24 Gráfico de índices de saturación en calcita y cuarzo para muestras.

Figura N° 5.1 Modelo conceptual geológico e hidrogeológico.

Figura 5.2 Sección geológica e hidrogeológica del sistema geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

Figura N° 5.3 Modelo conceptual geoquímico, (vista de planta).

Figura 5.4 Modelo geoquímico conceptual (perfil N-S).

Figura 5.5 Modelo conceptual integrado del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

Figura 5.6 Modelo conceptual integrado del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

### **Lista de cuadros**

Cuadro N° 1.1 Precipitaciones durante los meses de diciembre, enero, Febrero y Marzo de 1986 al 2010 (Fuente: SENAMHI en delgado 2012).

Cuadro 3.1 Inventario de Fuentes del Área de Estudio.

Cuadro 3.2 Cuadro de Porosidades totales y eficaces de diversos materiales. Datos, tomados de Jhonsosn (1967); Davis (1969), Schoeller (1962); Muskat (1937); Meinzer (1923b); Ward (1967); etc. En Custodio & Llamas (2001).

Cuadro 3.3 Tabla convencional de permeabilidad expresada en magnitud de la k a 10°C, bajo un gradiente de 1 m por metro, según Benítez (1963).

Cuadro 3.4 Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día), según varios autores.

Cuadro N° 3.5 Caracterización hidrogeológica en el Área geotermal del Colca.

Cuadro N° 0.1 Data Geoquímica disponible para la zona de estudio.

Cuadro N° 0.2 Presentación de resultados geotermométricas para la zona de estudio.

Cuadro N° 5.1 Características geológicas del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

Cuadro N° 5.2 Características geológicas y geoquímicas del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

### **Lista de Mapas**

MAF-2.1-2015. Mapa geomorfológico del sistema volcánico Ampato-Sabancaya; el estratovolcán Hualca Hualca y alrededores.

MAF-2.2-2015. Mapa geológico del sistema volcánico Ampato-Sabancaya; el estratovolcán Hualca Hualca y alrededores.

MAF-2.3-15 Geología Estructural del Área geotermal Hualca Hualca

MAF-2.4-15 Mapa de anomalías espectrales.

MAF-3.1-2015 Mapa de Inventario de Fuente.

MAF-3.2-2015 Mapa Hidrogeológico del sistema volcánico Ampato-Sabancaya; el estratovolcán Hualca Hualca y alrededores.



## **CAPITULO I ASPECTOS GENERALES**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

El Perú se localiza en el Cinturón de Fuego del Pacífico, caracterizado por la ocurrencia de movimientos sísmicos, fenómenos tectónicos y elevada concentración de flujo calorífico geotermal, especialmente en la zona volcánica del sur del país. El territorio peruano está dotado de recursos geotérmicos significativos y ubicados estratégicamente, cuyo potencial para generación eléctrica se estima en cerca de 3.000 MWe, el cual podría constituir una alternativa importante para incrementar la oferta energética.

El área de estudio se ubica en la zona Volcánica de los Andes Centrales (ZVC), zona volcánicamente activa, ubicado en el departamento Arequipa.

El presente estudio muestra los resultados obtenidos de los trabajos de campo y la integración de datos en geología, geoquímica e hidrogeología para obtener el modelo conceptual del área geotermal de Ampato Sabancaya y Hualca Hualca, el mismo que ayuda a entender el funcionamiento del sistema geotérmico de forma preliminar y así poder aportar información para conocer su potencial.

Partiendo de un nuevo Mapa Geológico a escala 1:25 000 y de análisis geoquímicas esperamos que este estudio pueda ser una herramienta útil para el fomento de futuras investigaciones geotérmicas de las diferentes áreas geotermales del Perú.

### **1.2 ANTECEDENTES**

Desde los años 70, se han realizado numerosos estudios de exploración preliminar de las manifestaciones geotermales iniciando el INGEMMET con el inventario de fuentes termales a nivel de todo el territorio peruano, posterior a ello la empresa la empresa estatal MINERO PERÚ en 1975 realizo estudios de exploración preliminar de las manifestaciones geotermales de las áreas Calacoa y Salinas en la región Moquegua.

La mayor parte de los estudios se realizaron en la parte sur del Perú donde se ubica la cadena volcánica activa y las zona más promisorias para el desarrollo geotérmico. Actualmente el INGEMMET viene realizando estudios en áreas geotérmicas a escala local, en las regiones de Arequipa, Puno, Moquegua y Tacna.

A continuación se detallan trabajos anteriores realizados cerca al área de estudio el mismo que contiene información relevante en cuanto a la exploración geológica hidrogeológica y estudios vulcanológicos.

- INGEMMET y AQUATER (1979-1980), los estudios fueron realizados con cooperación peruana italiana de Italia donde se efectuaron estudios de reconocimiento geotérmico de la Región V (ver imagen 1; mapa de Regiones geotermales del Perú), identificando las áreas de interés en los áreas de Tutupaca, Calacoa, Challapalca, Salinas, Chachani y Chivay (valle del colca).
- Peña, Vásquez, Carpio, Farfán & Sulca (2010) realizan el estudio denominada “Características Hidrogeológicas Del Valle Del Colca, Entre Chivay Y Maca” el estudio presenta un inventario de fuentes frías y termales así como una caracterización hidrogeológica de formaciones geológicas en base a un análisis de litopermeabilidad así

como análisis hidroquímicos para finalmente elaborar un modelo conceptual hidrogeológico sobre la dirección de movimiento de las aguas subterráneas.

- Mariño; Jersy (2011) Escenarios Eruptivos y Mapa de Peligros del Complejo Volcanico Ampato Sabancaya.
- Delgado; Rosmery (2012), “Estudio Geológico, Petrográfico y Geoquímico del complejo volcánico Ampato - Sabancaya (provincia caylloma, dpto. arequipa)”.
- Cruz; V. & Koji; M. (2012), “Caracterización Geoquímica De Las Manifestaciones Geotermales en el Valle del Colca, Chivay, Arequipa”, el trabajo de investigación muestra los resultados del estudio geoquímico de las manifestaciones geotermales del Valle de Colca – Chivay, Provincia de Caylloma, Región Arequipa, efectuados por el INGEMMET y West Japan Engineering Consultants, INC.

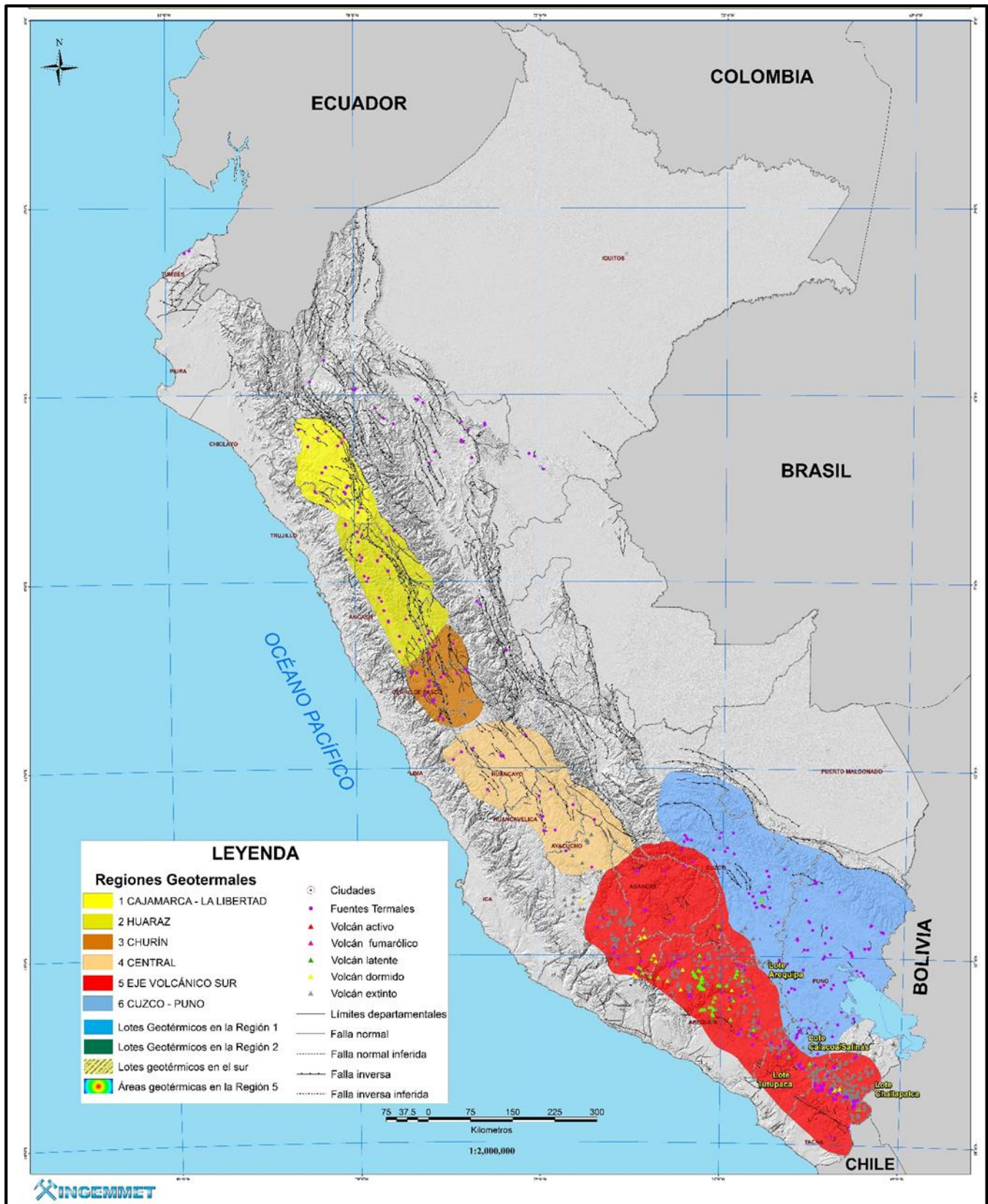


Figura N° 1.5 Mapa de Regiones Geotermales del Perú y manifestaciones visibles de energía geotérmica en superficie (Vargas & Cruz, 2010).

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La gran expansión urbana y el crecimiento poblacional a nivel mundial, así como en el Perú generan una mayor demanda de energía eléctrica para lo cual urge la necesidad de incrementar el porcentaje de generación de electricidad para la población. En el 2013 en el Perú la producción de electricidad a partir de las hidroeléctricas representaban el 52% seguida de las térmicas (gas natural, diésel y carbón) y solo el 3% corresponde a las energías renovables (solar y eólica), fuente tomado Ministerio de Energía y Minas (2014). De acuerdo a estos resultados casi la mitad de la generación viene hacer de la quema de combustible; por esta razón es recomendable diversificar las fuentes de energía provenientes de los recursos renovables como es la geotermia.

La geotermia ofrece una oportunidad única para integrar a la matriz energética una fuente autóctona, limpia, renovable y con capacidad de carga base. El territorio peruano está dotado de recursos geotérmicos significativos y ubicados estratégicamente, cuyo potencial para generación eléctrica se estima en cerca de 3.000 MWe. Perú es también uno de los pocos países sudamericanos que cuenta con una legislación geotérmica que promueve la participación del sector privado. A partir del 2010, varias empresas geotérmicas se involucraron en la exploración geotérmica en el Perú, y el Gobierno Peruano, con apoyo técnico y financiero de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), publicó en 2012 un Plan Maestro Nacional de Geotermia, con el objetivo de promover la implementación de la industria geotérmica en el país. Sin embargo, a pesar de todo el potencial e interés, la opción geotérmica en el Perú sigue luchando para tener éxito, y hasta la fecha no se ha logrado ninguna generación de energía con fuentes geotermiales; Muñoz et al; 2014.

Por ello es la importancia de realzar estudios como este, que contribuyan al conocimiento de las áreas geotermiales y favorezcan al desarrollo de los pueblos donde se ubican dichas áreas, donde quizá el uso no necesariamente sea para la generación de electricidad si no para el uso directo de este importante recurso como es, la geotermia.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO**

Como se ha mencionado anteriormente, el suministro de energía en el Perú se basa fuertemente en fuentes hidráulicas y de gas natural. Ambas fuentes son vulnerables a procesos ambientales y eventos sociales. Eventos naturales como sequías, inundaciones, peligros geológicos (por ejemplo: terremotos, derrumbes) pueden afectar al suministro y disponibilidad de agua y a la integridad de las infraestructuras. Con impactos similares para la generación, existen preocupaciones sociales relacionadas con la construcción de grandes proyectos hidroeléctricos y de infraestructura para el transporte del gas, poniendo serios desafíos para el otorgamiento de las licencias sociales.

En este contexto, fuentes de energía renovables y ambientalmente más amigables, como la geotermia, son necesarias y podrían jugar un papel importante para satisfacer la demanda y en la diversificación de la matriz energética que el Perú necesita para continuar en su crecimiento. La geotermia ofrece una oportunidad única para integrar al mix energético una fuente limpia, renovable y autóctona.

Las fuentes termiales en su mayoría se ubican en zonas alto andinas entre los 2000 y 4600 msnm., tal es el caso del área de estudio. A estas alturas las poblaciones sufren los efectos

negativos de la ocurrencia de bajas temperatura (helada y friaje); Poblaciones que se encuentran en situación de alta vulnerabilidad sea por su condición social (pobreza-limitado acceso a los medios para vivir dignamente), por su edad (niños, niñas, personas de edad avanzada) o por su ubicación territorial (retiradas de la acción del Estado), en se sentido el uso directo de recursos geotérmicos podría mitigar los efectos de bajas temperaturas extremas mediante el diseño e implementación de sistemas de calefacción comunitaria, por ende el presente estudio aportara con información técnica

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivo General**

Realizar la integración de datos geológicos-hidrogeológicos y geoquímicos para el área geotermal de Colca, Perú.

### **1.5.2 Objetivo específico**

- Evaluar la información geológica, geoquímica y geofísica existente.
- Determinar los tipos de agua.
- Realizar caracterización hidrogeológica con la finalidad de identificar materiales permeables e impermeables del sistema geotérmico.
- Determinar la recarga y descarga del sistema y su posible origen de las aguas
- Determinación la temperatura por medio de la geotermométrie
- Procesamiento e interpretación de la información geo científica.
- Proponer un Modelo Geotérmico Conceptual integrado en base a la geología, hidrogeología y geoquímica.
- Cuantificar aproximadamente el potencial geotérmico.

## **1.6 ALCANCES**

Los alcances del presente estudio permitirán afianzar más los conocimientos de las áreas geotérmicas del sur del Perú y la vez sea un documento útil para el fomento de futuras investigaciones geotérmicas en las diferentes áreas geotérmicas del Perú.

Además el estudio, pone en práctica todo lo aprendido durante el Diplomado de Especialización en Geotermia PREG 2015, fortaleciendo el conocimiento y las habilidades del personal del INGEMMET – Perú y de la GEO- El Salvador, para que puedan tener la capacidad para planificar y continuar con los estudios complementarios de exploración de recursos geotérmicos y el desarrollo geotérmico.

## **1.7 MARCO TEÓRICO**

### **1.7.1 Energía geotérmica**

Es aquella energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. El término "geotérmico" viene del griego geo (Tierra), y thermos (calor); literalmente "calor de la Tierra". Este calor interno calienta hasta las capas de agua más profundas: al ascender, el agua caliente o el vapor producen manifestaciones, como los géiseres o las fuentes termales, utilizadas para calefacción desde la época de los romanos. Hoy en día, los progresos en los métodos de perforación y bombeo permiten explotar la energía geotérmica en numerosos lugares del mundo. También se define como la porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre.

### **1.7.2 Clasificación según la Temperatura (tomado de Torres et al; 2013)**

#### ***Energía geotérmica de alta temperatura***

La energía geotérmica de alta temperatura existe en las zonas activas de la corteza. Esta temperatura está comprendida entre 150 y 400 °C, se produce vapor en la superficie y mediante una turbina, genera electricidad. Se requieren varias condiciones para que se dé la posibilidad de existencia de un campo geotérmico: una capa superior compuesta por una cobertura de rocas impermeables; un acuífero, o depósito, de permeabilidad elevada, entre 0,3 y 2 km de profundidad; suelo fracturado que permite una circulación de fluidos por convección, y por lo tanto la transferencia de calor de la fuente a la superficie, y una fuente de calor magmático, entre 3 y 15 km de profundidad, a 500-600 °C. La explotación de un campo de estas características se hace por medio de perforaciones según técnicas casi idénticas a las de la extracción del petróleo.

#### ***Energía geotérmica de temperaturas medias***

La energía geotérmica de temperaturas medias es aquella en que los fluidos de los acuíferos están a temperaturas menos elevadas, normalmente entre 70 y 150 °C. Por consiguiente, la conversión vapor-electricidad se realiza con un rendimiento menor, y debe explotarse por medio de un fluido volátil. Estas fuentes permiten explotar pequeñas centrales eléctricas, pero el mejor aprovechamiento puede hacerse mediante sistemas urbanos de reparto de calor para su uso en calefacción y en refrigeración (mediante máquinas de absorción).

#### ***Energía geotérmica de baja temperatura***

La energía geotérmica de temperaturas bajas es aprovechable en zonas más amplias que las anteriores; por ejemplo, en todas las cuencas sedimentarias. Es debida al gradiente geotérmico. Los fluidos están a temperaturas de 50 a 70 °C.

Energía geotérmica de muy baja temperatura. La energía geotérmica de muy baja temperatura se considera cuando los fluidos se calientan a temperaturas comprendidas entre 20 y 50 °C. Esta energía se utiliza para necesidades domésticas, urbanas o agrícolas, como la climatización geotérmica (bomba de calor geotérmica).

Las fronteras entre los diferentes tipos de energías geotérmicas es arbitraria; si se trata de producir electricidad con un rendimiento aceptable la temperatura mínima está entre 120 y 180 °C, pero las fuentes de temperatura más baja son muy apropiadas para los sistemas de calefacción urbana y rural.

### **1.7.3 Fenómenos que pueden indicar áreas geotérmicas.**

- ❖ Volcanismo reciente.
- ❖ Zonas de alteración hidrotermal.
- ❖ Emanaciones de vapor caliente o gases.
- ❖ Fuentes termales y minerales.
- ❖ Determinadas mineralizaciones y depósito de sales.
- ❖ Anomalía térmica.

### **1.7.4 Exploración geocientífica**

El objetivo principal de una exploración geocientífica en geotermia es: tomado de Torres et al. 2013.

- ❖ Identificar el fenómeno geotérmico

- ❖ Estimar el tamaño y potencial del recurso
- ❖ Localizar zonas productoras
- ❖ Determinar el tipo de fluidos
- ❖ Determinar el potencial de descarga de pozos
- ❖ Recopilar datos básicos para el futuro monitoreo
- ❖ Identificar características futuros problemas (extracción-reinyección, ambientales)
- ❖ Síntesis geocientífica, modelo conceptual.

### **Estudios Geológicos**

Identificar la ubicación y tamaño de las áreas de interés, Identificación de fallas, fracturas, desarrollo de mapas geológicos y estructurales, distribución y edad de las rocas, localización y naturaleza de manifestaciones termales, fuente de calor etc.

### **Estudios Geoquímicos**

Estimación de temperaturas del subsuelo (geotermómetros), identificar si el recurso es de vapor o líquido, propiedades químicas de los fluidos, caracterizar el agua de recarga naturaleza y fuente, edad de los fluidos (Isótopos) etc. Determinar el potencial de corrosión e incrustación durante la producción y reinyección.

### **Estudios Geofísicos**

Los estudios geofísicos son herramientas indispensables en la exploración geotérmica. Ellos ayudan a limitar nuestra comprensión de la estratigrafía, estructura y flujo de calor. Identificar cuál es la técnica geofísica que podría ser más apropiada y rentable en cualquier programa de exploración específica requiere la colaboración de científicos geotérmicos experimentados.

Es la aplicación de los principios de las ciencias mecánicas, térmicas y eléctricas Para delinear y caracterizar el sistema geotérmico. Provee la pieza final del rompecabezas, ayuda a ubicar sitios para perforación.

Algunas de las técnicas más usadas son: Medición de Flujo de Calor, Mediciones de gradiente térmico, resistividad eléctrica, métodos sísmicos (activo y pasivo), gravimetría, magnetometría, magneto telúrica, tomografía sísmica.

Las propiedades que se miden son: - Temperatura - Conductividad o resistividad eléctrica - Densidad- Velocidad de propagación de las ondas en materiales sólidos - Susceptibilidad magnética - Aceleración local de la gravedad.

### **1.7.5 Modelo conceptual (tomado de Torres et al; 2013)**

Descripción de un sistema basado en cualitativos, suposiciones acerca de sus elementos, sus interrelaciones y los límites del sistema. Se usa para identificar zonas promisorias de ocurrencia de un reservorio geotérmico, guiar la exploración profunda y evaluar el nivel de riesgo.

La revisión del modelo conceptual es, obviamente, vital durante la expansión de las operaciones geotérmicas. Los modelos conceptuales son modelos descriptivos o cualitativos incorporando y unificando, los rasgos físicos esenciales de la los sistemas en cuestión (Grant et al., 1,982).

Un modelo geotérmico conceptual contiene los siguientes elementos: Fuente de calor Reservorio, acuíferos Capa sello Zona de ascenso de fluidos calientes (zona de “upflow”) Patrón de circulación de fluidos Zona de recarga Zona de descarga (zona de “outflow”).

La definición de estos elementos se basa en los resultados de los estudios geocientíficos, dentro de los cuales la geología juega un papel muy importante.

Los modelos conceptuales confiables de los sistemas geotérmicos son la clave para el desarrollo exitoso de todos los recursos geotérmicos y cada vez más se está poniendo énfasis en el desarrollo de tales modelos, especialmente durante la exploración y el desarrollo geotérmico, así como su revisión durante la utilización a largo plazo y el manejo del recurso.

### **Modelo conceptual Geoquímico**

Deberá contener la información geoquímica obtenida durante la exploración determinar: La clasificación de las aguas, diferenciación del tipo de aguas, recarga del sistema hidrotermal, geotermómetros de aguas y de gases, origen de los gases, evaluación de estructuras mediante los gases difusos.

### **Modelo conceptual Geológico**

El modelo geológico conceptual se define como el modelo descriptivo o cualitativo de un sistema o de una sección de un sistema geotérmico, que incorpora los rasgos geológicos esenciales, que se ajusta a las características esperadas por el modelador.

Al elaborar el modelo geológico conceptual se debe tener presente los siguientes aspectos:

- ❖ ¿Cuál es la secuencia estratigráfica que se podría encontrar en función de la profundidad?
- ❖ ¿Cuáles de las formaciones rocosas tienen buenas condiciones de permeabilidad y permiten almacenar el agua en profundidad (reservorio)?
- ❖ ¿Cuál es la posible fuente de calor? (¿es por flujo de calor regional o por intrusiones magmáticas locales?)
- ❖ ¿Cuál formación de rocas podría funcionar como capa sello?, ¿son rocas impermeables?, ¿por autosellamiento o por precipitación de minerales?
- ❖ ¿Cuáles estructuras podrían controlar el movimiento de los fluidos en profundidad?.

### **Modelo conceptual Geofísico**

Durante la fase de exploración, se prepara un modelo conceptual del recurso. Este modelo se perfeccionará a medida que se reúnen más datos. Un modelo conceptual es una representación de la mejor y actual comprensión de un sistema geotérmico, coherente con todos los datos e información conocidos.

El modelo debe contener información geológica y tectónica suficiente para permitir que exista una primera estimación de la distribución del recurso, la temperatura, y el tamaño.

Se utiliza para definir pozos profundos, de diámetro pequeño o comercial, dirigido hacia las unidades litológicas y / o estructuras con la mayor probabilidad de entregar una tasa comercial de fluidos geotérmicos.

Si bien se espera que el modelo conceptual inicial puede ser crudo o incompleto, es importante tener un modelo inicial que puede ser refinado y mejorado a medida que avanzan las perforaciones y más datos estén disponibles.

### **Modelo de Integración Geocientífica**

Es la puesta en común de elementos separados para crear una unidad completa y al combinar las partes forman un todo y la puesta en común de elementos separados donde se crea una unidad completa.

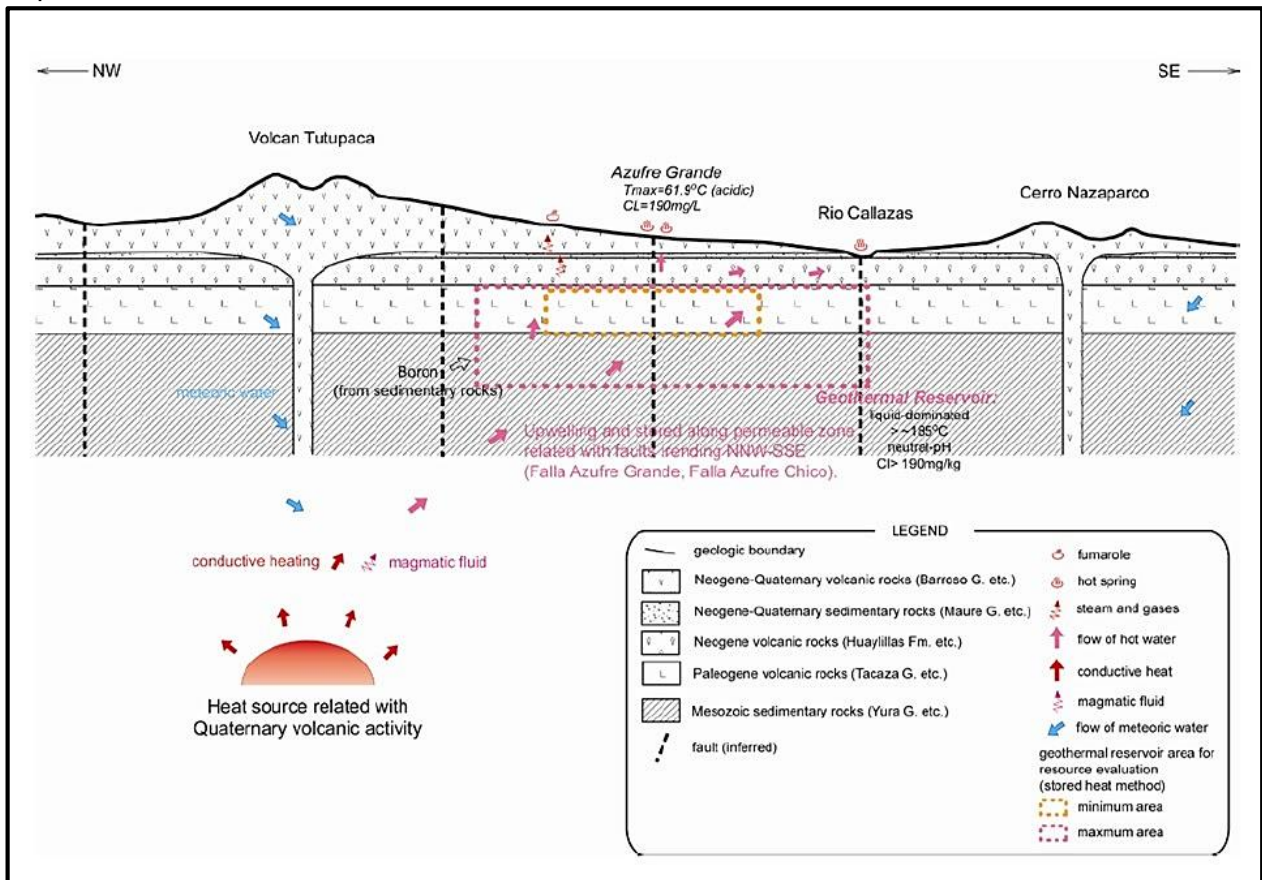


*“Integración de datos geológicos y geoquímicos de un área geotermal, caso de estudio Colca-Perú”*

La integración concluye con: Una síntesis de resultados, Modelo Conceptual Geotérmico. Análisis Probabilístico de existencia recurso y estimación de potencial. Análisis de Riesgo.

El Modelo conceptual integrado tratará de describir los componentes del sistema geotérmico: El Origen, extensión y profundidad de la fuente de Calor La posición, profundidad, extensión y temperatura del yacimiento. La litología y permeabilidad de la formación o unidad geológica en la que se podría encontrar el reservorio. (Capacidad Calorífica, Cond. Térmica, porosidad etc) El modelo de circulación hídrica en el subsuelo y las posibles recarga y descarga del reservorio. - Las características de los límites del reservorio, entre ellos la capa sello y el basamento.

Esta integración es muy importante, debido al costo actual de la perforación se hace necesario valorar con cuanta certeza o nivel de riesgo se cumplirán con los Objetivos previstos. Se requiere que la decisión de perforar un pozo esta soportada por el nivel de confianza sobre el resultado esperado.



**Figura N° 1.6** Modelo conceptual del sistema geotermal en Tutupaca – Perú, tomado del Plan Maestro, 2012.

### **1.7.6 Fases de un proyecto geotérmico**

**Reconocimiento >500 km<sup>2</sup>.**- Etapa que comprende con áreas con mejores prospectos para la exploración geotermia

**Prefactibilidad 50-100 km<sup>2</sup>.**-Modelo geotérmico preliminar, ubicar pozos de exploración.(Hidrogeología comprobación en campo de geología, geoquímica, geofísica poco detalle pozos someros / gradiente).

**Factibilidad 10-15 km<sup>2</sup>.**-Verificar/características del yacimiento, determinar la viabilidad técnica/económica explotación del recurso geotérmico. (Pozos exploratorios profundos, estudios de reservorios)

**Desarrollo.**-Definir estrategias de explotación sostenible en el tiempo. (Pozos de explotación - Sistema de conducción, diseño de utilización (generación, uso directo).

## **1.8 METODOLOGÍA**

### **1.8.1 Criterios Geológicos**

#### **Fases:**

#### **Gabinete:**

Comprende realizar recopilación existente del área de estudio en gran parte generada por el INGEMMET, entre ellos la morfología del terreno, geología, tectónica, vulcanología e información de zonas de alteración hidrotermal, adicionalmente se obtendrá información de teledetección, esta información aportara para elaborar el mapa geológico a escala 1:25,000 Posteriormente se realizara la interpretación de los datos para luego definir el modelo geológico conceptual de la zona de estudio que contendrá información de la ubicación de la fuente de calor, roca reservorio, capa sello, basamento y zonas de recarga de aguas.

#### **Campo:**

Se tomaron datos de campo como rumbos y buzamientos de los afloramientos rocosos y de estructuras.

### **1.8.2 Criterios Hidrogeológicos**

#### **Fases:**

#### **Gabinete.**

Comprende recopilación bibliográfica de información hidrológico, hidroquímico e hidrogeológico, así como determinar la extensión del área de estudio, en base a limites hidrológicos, litológico y estructurales, y mediante el uso de fotografías aéreas de bajo vuelo e imágenes satelitales (landsat bandas RGB 427) delimitar de posibles áreas de recarga con influencia en las áreas geotérmicas, además de identificar la presencia de fuentes de aguas subterráneas (termales y frías), también contempla la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual donde se determinara los patrones de flujo, las unidades hidrogeológicas (sub superficial y profundo) y las zonas de recarga y descarga.

#### **Campo**

Contempla realizar cartografiado hidrogeológico por litología, identificando formaciones geológicas con capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea, determinar las áreas de

recarga de los campos geotérmicos, y la posible interconexión de los acuíferos superficiales con los profundos, además se obtuvieron ensayos de infiltración por el método Lefrang para determinar la conductividad hidráulica de los materiales (permeabilidad).

### **1.8.3 Criterios. Geoquímicos**

**Fases:**

**Gabinete:**

Básicamente es la recopilación de la información geoquímica existente (resultados de análisis químicos e isotópicos) y posterior a los trabajos de campo se realizan las interpretaciones de los resultados analíticos, estimación de temperaturas de reservorio y los reportes respectivos. Así como, elaborar el modelo conceptual geoquímico de las diferentes zonas geotérmicas.

**Campo:**

Consiste en el muestreo de las manifestaciones geotermales, manantiales, fumarolas, pozas ácidas, gases difusos, así como caracterizar los productos de alteración hidrotermal. Las muestras son enviadas al laboratorio para el análisis químico e isotópico correspondiente, cuyos resultados permitirán inferir las condiciones físico-químicas de los fluidos provenientes del reservorio geotérmico.

## **1.9 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### **1.9.1 Ubicación y Accesibilidad**

El área de estudio se localiza en la Cordillera Occidental de los Andes del sur del territorio peruano, en la región Arequipa y provincia de Caylloma, entre las coordenadas UTM zona 19S 810956; 8244650 & 8882013; 8297463 y a una altitud de 2410 en el valle del Colca y 6200 msnm en la parte alta del volcán Ampato. Hidrográficamente se ubica en gran parte en la cuenca de los ríos Camana-Majes-Colca, cuya dirección preferencial del curso del río es de Oeste-Este (ver mapa 1.1)

De acuerdo al mapa de Regiones Geotermales planteados por (Vargas & Cruz 2010), el área de estudio se ubica en la Región Eje Volcánico Sur, zona promisorio para el desarrollo de la geotermia de alta entalpia. El termalismo de la zona de estudio esta relacionado principalmente al complejo volcánico denominada Ampato-Sabancaya (CVAS), el mismo que forma parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC); localizada entre el sur del Perú, Bolivia y el norte de Chile (15°S a 28°S), y que se ha mantenido activa durante el Plio-cuaternario (De Silva, 1991), ver figura 1.1.

El área de estudio se localiza 70 km al noreste de la ciudad de Arequipa, para acceder se realiza principalmente por la vía asfaltada Arequipa – Chivay (Cañón del Colca), el trayecto en promedio toma un tiempo de 3 horas aproximadamente por bus.

“Integración de datos geológicos y geoquímicos de un área geotermal, caso de estudio Colca-Perú”

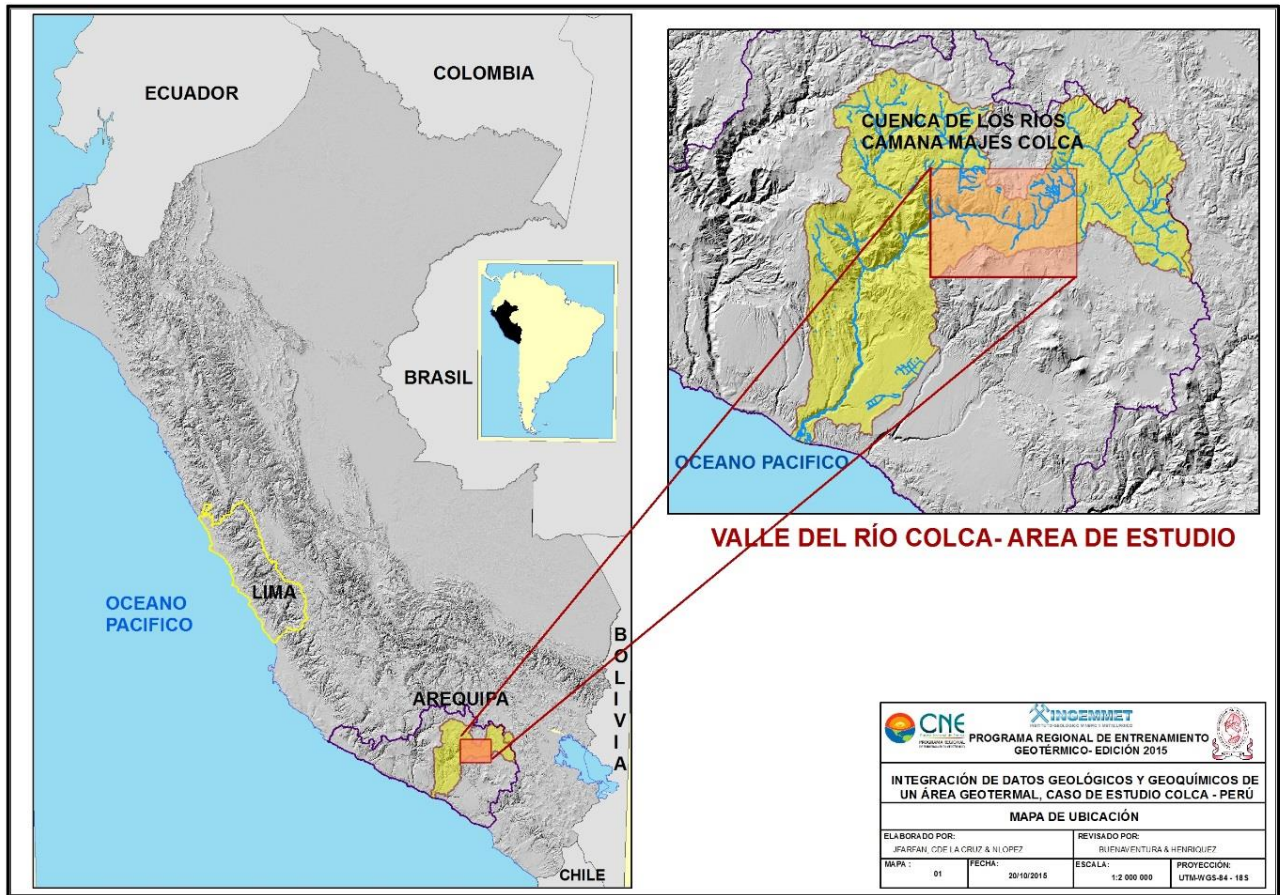


Figura N° 1.7 Ubicación de la zona de estudio.

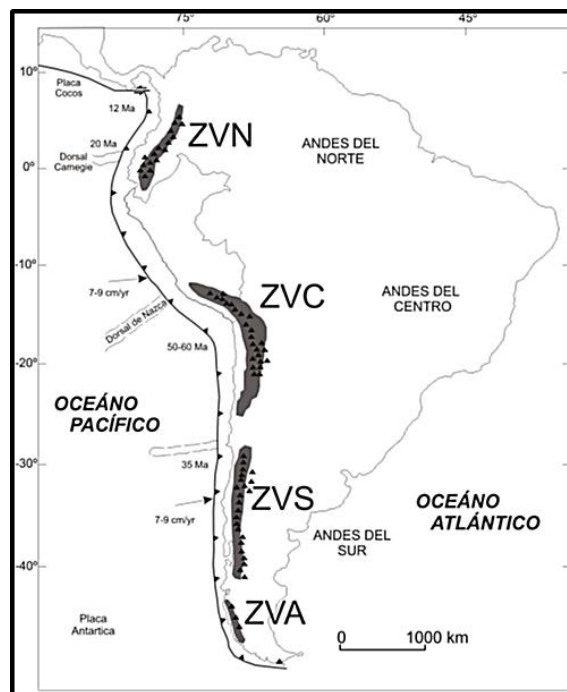


Figura N° 1.8.-Zonas volcánicas en los Andes de Sudamérica (ZVN, ZVC, ZVC, ZVA, Norte, Centro, Sur y Austral respectivamente) (Ramos y Alemán, (2000) y Gutscher, (2000).

### 1.9.2 Clima y Vegetación

El área de estudio comprende una superficie 4063 km<sup>2</sup>, donde el clima se caracteriza por ser templado y seco, típico de la parte alta de la región Arequipa, Según los datos de la estación de Chivay; Las lluvias son de carácter estacional, principalmente se presentan entre los meses de diciembre a marzo, aunque con esporádica presencia en los meses de septiembre y octubre, donde el promedio anual para los meses de diciembre a marzo varía entre 13.4 y 49.7 mm. Cabe destacar que entre las altitudes de 5,000 a 6,000 msnm donde se localizan el complejo volcánico Ampato-Sabancaya, las precipitaciones ocurren en forma de granizo o nieve. Por otra parte, la época seca se da durante los meses de abril a noviembre. Las temperaturas máximas registradas fluctúan entre los 18.3°C a 20.8°C y las temperaturas mínimas pueden llegar a 2.5°C bajo cero (Delgado, 2012), ver cuadro 1.1.

Año	PRECIPITACIÓN (mm)				Promedio Anual
	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	
1986	105.5	97.0	178.1	135.9	49.7
1987	*	71.9	28.6	38.3	13.4
1988	22.8	190.9	18.8	33.0	26.9
1989	0.0	71.0	56.4	25.6	18.1
1990	93.7	59.0	26.2	60.7	34.6
1991	34.8	122.1	55.8	127.4	39.6
1992	*	22.5	26.5	3.2	17.0
1993	53.8	104.5	30.8	90.5	27.9
1994	36.5	158.6	132.7	50.3	35.0
1995	49.4	101.5	25.1	136.4	29.7
1996	51.5	66.9	168.4	54.1	34.5
1997	76.0	119.0	163.2	104.8	48.0
1998	70.6	137.5	66.2	69.3	32.3
1999	51.9	98.8	169.8	176.5	49.7
2000	56.7	180.7	121.0	103.8	46.7
2001	12.8	121.2	198.9	98.4	43.8
2002	103.5	72.2	149.9	133.3	48.3
2003	46.6	40.3	91.0	66.0	23.0
2004	37.1	144.8	90.1	121.9	39.1
2005	68.2	68.7	106.9	67.0	28.3
2006	33.9	116.8	114.8	165.0	43.4
2007	53.3	138.8	120.8	102.9	39.4
2008	61.0	262.3	111.9	32.4	39.6
2009	14.4	81.5	156.8	83.5	35.8
2010	*	63.9	88.9	44.0	25.1

**Cuadro N° 1.2** Precipitaciones durante los meses de diciembre, enero, febrero y marzo de 1986 al 2010 (Fuente: SENAMHI en delgado 2012).

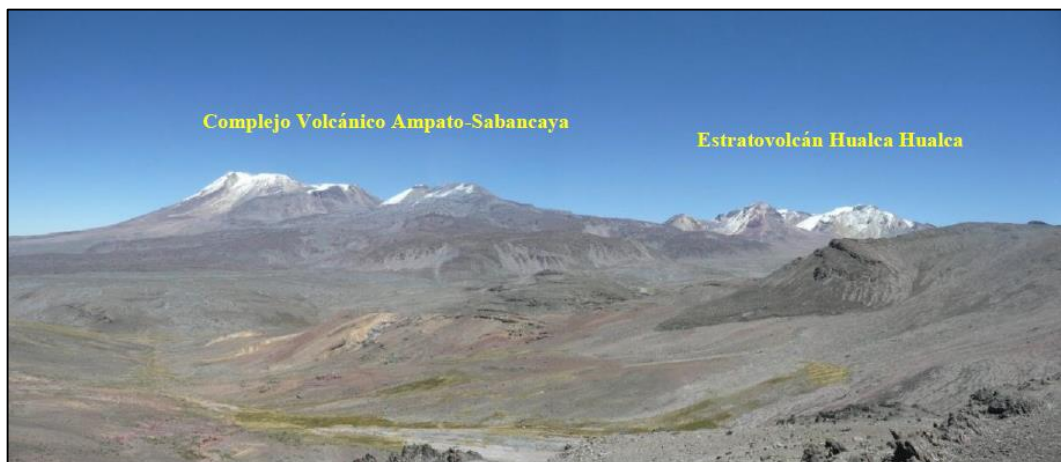
## CAPITULO II CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO, GEOLÓGICO Y ESTRUCTURAL

### 2.1 GEOMORFOLOGÍA

En este apartado se describen las unidades geomorfológicas resaltantes del área de estudio, el cual corresponden generalmente a geoformas volcánicas y glaciares formadas entre el Pleistoceno y Holoceno. Las importantes geoformas de origen volcánico están dominados al sur por el complejo volcánico Ampato-Sabancaya y al norte por el estratovolcán Hualca Hualca, (Figura. 2.1).

Las geoformas de origen glaciar cuya expresión morfológica es establecida por la erosión intensa ocasionada por el movimiento de grandes masas de hielo que fueron sometidos durante las glaciaciones pleistocénicas, dejando como consecuencia valles glaciares, depósitos de morrenas, flujos de lava altamente erosionados, peneplanicies y altiplanicies volcánicas.

En los Andes Centrales la edad y extensión del *Late Glacial Maximun* (LGM) no se conoce con exactitud, según Clapperton (1991) ocurrió hace 18 ka, mientras que para Smith et al. (2005) ocurrió hace 32 ka. Estudios realizados por Alcalá (2007) sobre morrenas del Nevado Hualca Hualca, cercano al complejo volcánico Ampato-Sabancaya, establece que en esta zona el LGM ocurrió hace 18 ka.



**Figura N° 2.1.** Vista desde la localidad Lillipampa del complejo volcánico Ampato Sabancaya y el estratovolcán Hualca Hualca. Tomado de Delgado, R. 2012.

#### 2.1.1 Geoformas de origen volcánico

Las principales geoformas volcánicas consiste de vertientes montañosas y colinas empinadas a escarpadas desarrollados en zonas de lavas antiguas, zona de lavas intermedias, zonas de lavas recientes; también se observan edificios volcánicos glaciados, estrato-conos, conos cumbre, domos, cráter, zona de volcanoclastos y lahares, planicies de caídas piroclásticas.

#### Zonas de cumbres

##### Cono de la cumbre (Con-cu)

Se denominan cono de la cumbre, a los dos conos emplazados en la parte sumital de los volcanes Ampato y Sabancaya, y que representan las fases finales de la construcción de dichos edificios. El cono de la cumbre del Ampato, se emplaza por encima de los 5900 msnm,

posee baja a moderada pendiente (5° a 30°) y esta conformado por flujos de lava, cubiertos parcialmente por glaciares. Posiblemente se formo durante el Pleistoceno tardio. El cono de la cumbre del Sabancaya se encuentra por encima de los 5700 msnm., tambien posee baja a moderada pendiente y esta conformado por flujos de lava cubiertos por depositos de ceniza. Se formo durante los ultimos miles de años, (Mariño, J. 2010).

### **Domos (Dom)**

Se han identificado dos complejos de domos-colada. El primer domo-colada se emplaza en el flanco norte del volcan Ampato, entre los 5600 y 6000 msnm, tiene una morfologia elongada en direccion SO-NE, y un tamaño de aproximadamente 850 y 550 m de largo y ancho respectivamente. El segundo complejo de domo-colada se emplaza en el sector suroeste del volcan Sabancaya, por encima de los 5850 msnm. Este segundo domo-colada tiene forma elongada, en direccion NE-SO, posee alrededor de 400 m de largo y 250 m de ancho, (Mariño, J. 2010).

### **Cráter (Cra)**

En el complejo volcanico Ampato-Sabancaya se ha identificado solo un crater, el cual se halla en la cima del volcan Sabancaya, a 5950 msnm. El cráter posee forma semi-circular, con 300 m de diametro y cerca de 200 m de profundidad. Posiblemente se formo durante erupciones ocurridas en epoca historica.

### **Estrato-conos (Est-co)**

En el complejo volcanico Ampato-Sabancaya se han identificado dos estratoconos, el primero situado al sur, en el edificio Ampato, y el segundo al norte, en el edificio Sabancaya. Los estrato-conos se emplazan por encima de los 5100 msnm, se caracterizan por presentar pendientes moderadas a fuertes (30° a 50°), y un drenaje radial. Estos estrato-conos poseen formas ligeramente conicas. Estan conformados por secuencias de flujos de lavas y depositos piroclasticos, normalmente cubiertos por caidas de ceniza reciente. Posiblemente se construyeron durante el Pleistoceno tardio y Holoceno, (Mariño, J. 2010).

### **Vertiente montañosa y colinas empinadas a escarpadas**

Esta unidad se desarrolla en zona de lavas antiguas (Lav-an), intermedias y recientes descritas por Mariño, J. 2010. Conforman relieves de baja a moderada pendiente (5°-25°). Las lavas más antiguas conforman el sustrato sobre el cual se ha emplazado el complejo volcánico Ampato-Sabancaya y el estratovolcan Hualca Hualca, tambien se incluye en esta unidad a flujos de lava que afloran al sur del volcán Ampato.

Las lavas intermedias (Lav-in) se diferencian de las anteriores debido a que conservan parcialmente estructuras de flujos, ya que fueron moderadamente afectados por la erosión glaciar; estas corresponden a flujos de lava emitidas por el volcan Ampato y que esta conformando la base de dicho volcan, Estas afloran al sur, este y oeste de dicho volcan, normalmente entre los 4000 y 5000 msnm.

Las lavas recientes (Lav-rec) presentan estructuras angulosas y fueron emitidas por el volcan Sabancaya, posiblemente durante el Holoceno, ya que no han sido afectados por la erosion glaciar ocurridos durante el LGM y re-avances glaciares posteriores.

### **Vertiente montañosa y colinas moderadamente empinada (Acu-mo)**

Esta unidad esta conformada por depósitos morrenicos, principalmente al sur y oeste del volcán Ampato. Según Alcalá (2007), en las morrenas se han encontrado cordones y arcos morrenicos. Los cordones estan asociados con lenguas glaciares que estuvieron canalizadas, sin embargo los arcos frontales corresponden con el limite de afectacion glaciara.

Mariño, 2010 ha identificado hasta tres generaciones de morrenas: antiguas, intermedias y recientes. Las morrenas antiguas corresponden a morrenas frontales situadas a mas de 10 km al sur del volcan Ampato, entre los 3800 y 4300 msnm, y se hallan afectando a los flujos de lava basales del volcan Ampato. Las morrenas intermedias son las mas extendidas, se emplazan entre los 4300 y 5000 msnm, se han identificado al sur, soroeste y noroeste del Ampato y posiblemente esten asociadas al LGM. Las morrenas mas recientes se hallan normalmente por encima de los 5000 msnm, en los flancos de los estrato-conos Ampato y Sabancaya, y posiblemente estan asociados a re-avances glaciares posteriores al LGM, de hace 15-13 ka y hace 12-10 ka.

### **Vertiente montañosa empinada a escarpada (Vol-la)**

Se caracteriza por presentar superficies sub-horizontales a horizontales y ligeramente onduladas. Esta conformada por una secuencia de depositos laharicos y piroclasticos, emplazados por los volcanes Ampato y Sabancaya. Esta morfologia se observa principalmente al sur del complejo volcanico Ampato-Sabancaya, entre los 3900 y 4300 msnm, sobreyaciendo a flujos de lava del sustrato.

### **Vertiente allanada y disectada**

Esta unidad se refiere al valle del río Colca, el área se ubica en la cuenca media de este río, el cual aguas abajo en el cuadrangulo de Huambo forma un relieve encañonado conocido como el Cañón del Colca; como unidad morfológica es la prominente configuración del valle que ha labrado y atraviesa de NE-SO, El Cañón alcanza 1 500m de profundidad en la localidad de Choco, con ancho a nivel del lecho del río de 100-150m.

### **Altiplanicie ondulada y disectada (Cai-pi)**

Esta unidad se ha identificado al SE y NE del volcan Sabancaya. Se caracterizan por presentar superficies sub-horizontales a horizontales y ligeramente onduladas. Esta constituida por caidas piroclasticas de ceniza y lapilli de pomez, emplazadas por el volcan Sabancaya durante el Holoceno y posiblemente durante la epoca historica.

#### **2.1.2 Geofomas de origen glaciara**

Al SE y SO del área de estudio se han identificado valles glaciares, circos glaciares y extensas zonas de acumulaci3n de morrenas. Las morrenas más jóvenes podrían estar asociadas a avances glaciares ocurridos en el Neo-glaciara, es decir en los últimos 5 ka, (Mariño, J. 2010).

### **Valles glaciares (Val-gl)**

Se han identificado dos valles glaciares, ubicados a menos de 7 km al oeste del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Estos valles poseen alrededor de 12 km de largo, son paralelos, alineados NE-SO, entre los 4400 a 4900 msnm. Son valles en forma de “U”, limitados por extensas morrenas laterales. En el fondo de los valles glaciares, existen bofedales y en algunos casos flujos de lavas y depósitos aluviales.



### **Circos glaciares**

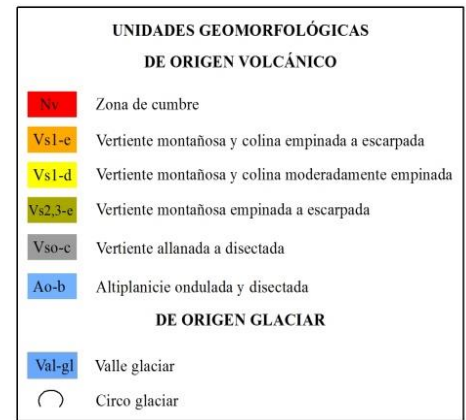
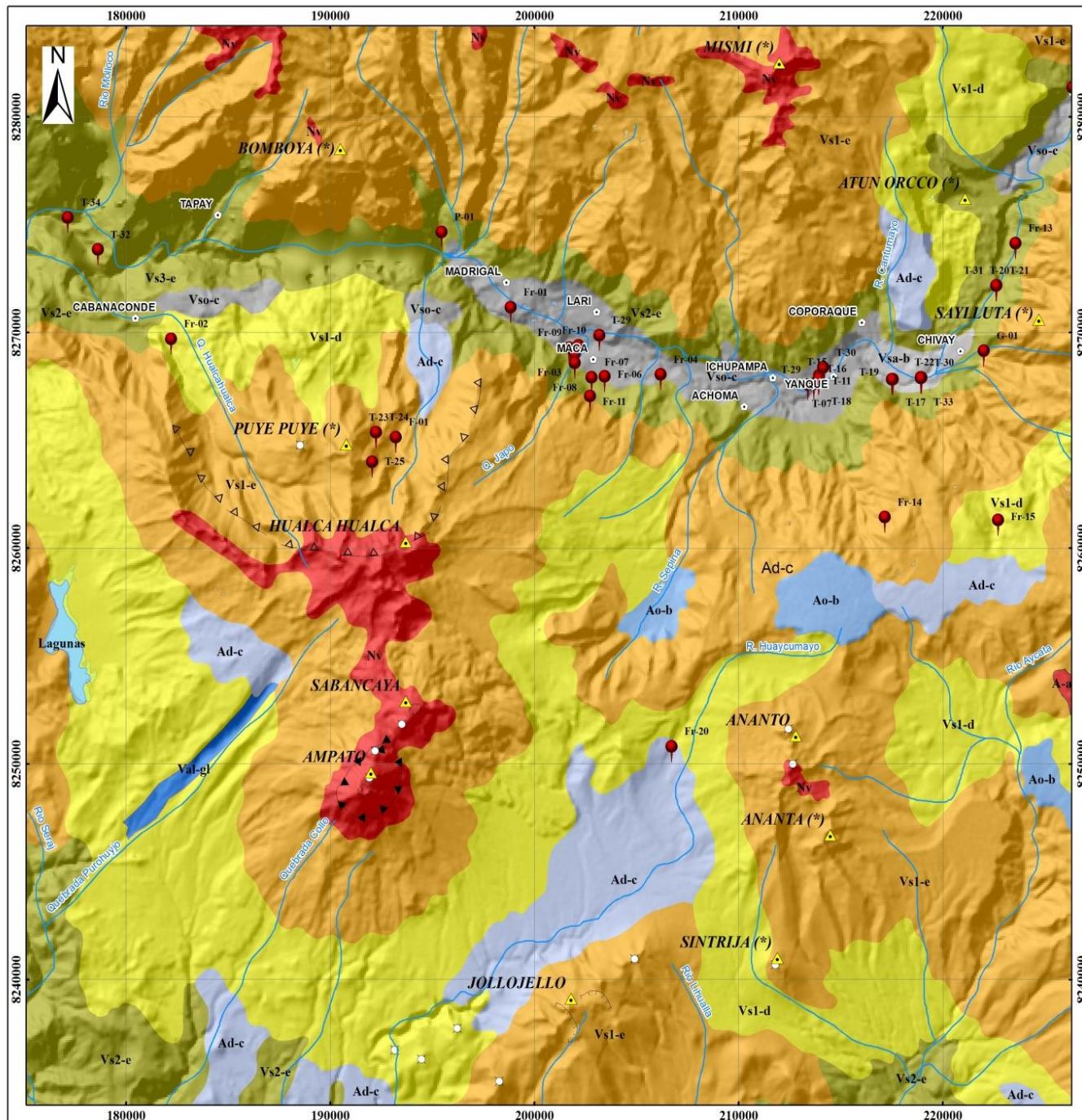
Los circos glaciares se encuentran por encima de los 4900 msnm, se han identificado al menos dos que están ubicados en el flanco suroeste del volcán Ampato. Los circos glaciares poseen forma de herradura, el mayor de ellos tiene un diámetro de entre 1 y 1.2 km, y el menor, ubicado al norte del anterior, posee entre 0.7 y 0.9 km de diámetro. Ambos circos se encuentran “abiertos” hacia el suroeste, (Mariño, J. 2010).

### **Edificios volcánicos glaciados (Edi-gl)**

Se trata de estratovolcanes del Plioceno que han sido bastante afectados por la glaciación, por lo que no poseen formas cónicas. Corresponden a los estratovolcanes Hualca Hualca (norte). Estos edificios volcánicos están parcialmente destruidos debido a procesos glaciares, colapsos sectoriales (avalanchas de escombros) y movimientos de remoción en masa. Por esta razón presentan escarpas, circos glaciares, cicatrices de colapso y flancos de moderada a fuerte pendiente (30° a 70°).



**Figura N° 2.2** Vista del flanco oriental del Complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Se observa lavas recientes que presentan superficies rugosas y estructuras angulosas. Al fondo se tiene estrato-cono, conos de la cumbre y domos. Foto tomada de Mariño, J 2010.



**INGEMMET**  
PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO GEOTÉRMICO - EDICIÓN 2015

**CNE**  
PROGRAMA REGIONAL DE ENTRENAMIENTO

**INTEGRACIÓN DE DATOS GEOLOGICOS Y GEOQUIMICOS DE UN ÁREA GEOTERMAL, CASO DE ETUDIO COLCA-PERÚ**

**MAPA GEOMORFOLÓGICO**

ELABORADO POR: CDELACRUZ, JARFAN y NLOPEZ	REVISADO POR: BUENAVENTURA y HERNRIQUEZ
MAPA: MAF-2.1-15	FECHA: 20/10/2015
ESCALA: 1:180 000	PROYECCIÓN: WGS84 - Z19 S

**MAF 2.1.** Mapa geomorfológico del sistema volcánico Ampato-Sabancaya; el estratovolcán Hualca Hualca y alrededores

## **2.2 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA GEOTERMAL AMPATO-SABANCAYA-HUALCA HUALCA**

### **2.2.1 Complejo Majes Colca**

Conjunto de rocas metamórficas, que afloran mayormente a lo largo de la cordillera de la costa del sur del país. Buenas exposiciones de estas rocas se han reconocido en el sector noroccidental del cuadrángulo de Huambo, a lo largo del cañón labrado por el río Colca. La composición mineralógica de los gneises varía de un lugar a otro, probablemente por la relación con las rocas originales de su procedencia. Los gneises que afloran en las partes altas de Andamayo son dioríticos – tonalíticos, con bandas de cuarzo-feldespáticas, que alteran con bandas oscuras, constituidas por minerales máficas mayormente, biotita y sericita.

Los gneis están cubiertos por derrames del grupo Barroso y un poco más al noreste, por unidades del grupo Andahua, se les encuentra también intruidos por un granito rosado compuesto predominantemente por ortosa rosada, poca plagioclasa y cuarzo, abundante biotita y escasos cristales de hornblenda. Intrusivo que por su naturaleza alcalina, se le considera parte integrante del complejo metamórfico, y a la vez tiene marcada diferencia con un leucogranito que intruye a ambas unidades.

Se presume, que los gneises del Complejo Majes Colca pertenecen al Precámbrico antiguo y se les correlaciona con unidades del Complejo Basal de la Costa y del Complejo del Marañón, que en conjunto son partes integrantes del Escudo Brasileiro y su separación se debe a procesos tectónicos y ciclos de vulcanismo y sedimentación a través del Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

La presencia del complejo metamórfico a lo largo del cañón y en los alrededores del pueblo de Choco, lugares próximos al eje de la Cordillera de los Andes, hace presumir que se trata de un macizo que se mantuvo emergido en las primeras etapas del ciclo de sedimentación andina, probablemente a manera de un intrageoanticlinal, lo que explica también la ausencia en este sector de las unidades del Grupo Ongoro y de la formación Socosani, que permiten al Grupo Yura yacer directamente sobre los gneises del valle del Colca. La unidad basal del edificio andino está constituida mayormente por el Complejo Majes-Colca.

### **2.2.2 Formación Socosani**

Buenas exposiciones de la formación Socosani se encuentran en el sector meridional del cuadrángulo de Huambo, en el área comprendida entre la estancia de Tajarqui y la quebrada Huacani Grande, la sección se presenta a lo largo de una franja de orientación N 45° O.

Litológicamente, los niveles superiores de la formación están constituidos por calizas margosas en capas delgadas, de color gris beige, que alternan con calizas bituminosas nodulares de color gris oscuras. Además es frecuente dentro de la unidad, la presencia de horizontes con coquinas de lamelibranchios bien conservados.

En el cerro Timar la caliza esta sobrecabalgada por el gneis del Complejo Majes-Colca, y en la región de Arequipa la caliza cabalga en las rocas intrusivas del Batolito de la Costa, L. Vargas (1970).

Benavides, V (1962), le asigna un rango de edad comprendido entre el Toarciano superior y el Bajociano medio. En el área estudiada, se han encontrado fósiles de los géneros Harpoceras

Subplatum, Harpoceras cf. *H. radians* (gramoceras) y *Posidonia* cf. *Alpina*, que confirman la edad comprendida entre el Liásico superior y el Dogger.

Esta formación se correlaciona con sus similares del sur del Perú y en parte con la formación Pelado (J. Wilson y W. García, 1962). Así mismo es equivalente a las formaciones Chunumayo (Bajociano medio), Cercapuquio (Bjociano inferior-Aaleniano inferior) y Condorsinga (Sinemuriano superior-Toarciano superior), descritas en el centro del país por F. Megard (1968).

### **2.2.3 Grupo Yura (+- 1000m)**

Los afloramientos dentro de la cuenca hidrográfica Camaná-Majes-Colca están condicionados específicamente a zonas con una elevada actividad tectónica. En primer lugar, los afloramientos más importantes se encuentran en el dominio morfoestructural de la vertiente oeste de la Cordillera Occidental, dominado por la acción del sistema de fallas Chíncha-Lluta-Incapuquio, que hacen aflorar a lo largo de su recorrido a este grupo con una tendencia promedio NO-SE.

Las rocas pertenecientes al Grupo Yura se caracterizan por corresponder a una sucesión sedimentaria conformada por las formaciones Puente, Cachíos, Labra, Gramadal y Hualhuani en sucesiones cronológicamente continuas y similares a las descritas en Arequipa por Jenks (1948) y Benavides (1962). Estas unidades están ampliamente distribuidos a lo largo de la cuenca hidrográfica Camaná-Majes-Colca, los espesores que corresponden a este grupo varían según a la posición en la cuenca sedimentaria, lográndose cuantificar en el área de estudio 1 000m aproximadamente.

#### **Formación Puente**

Los afloramientos de esta unidad estratigráfica se encuentran sobreyaciendo en contacto discordante sobre las rocas del Complejo Majes Colca. La base de esta formación está conformada por arcosas de grano medio a grueso, distribuido en estratos con potencias entre 2 y 5 m. Estas arcosas poseen granos subangulosos en una matriz arcillosa abundante. En la parte media y superior se observan intercalaciones de arcosas y limolitas color gris oscuro a negro; se observa que los estratos de arcosa presentan laminación oblicua curva de bajo ángulo, además de estar con buena proporción de restos de hojas y troncos. En cambio, las limolitas poseen fragmentos de fósiles de amonites, bivalvos y gasterópodos. La actividad tectónica hizo que los sedimentos correspondientes a la formación Puente, sufrieran un fuerte metamorfismo, observándose metasedimentos con bandeamientos de dirección NO-SE paralelos a la falla principal. Estos afloramientos se ubican al oeste de la localidad de Cabanaconde.

#### **Formación Cachíos**

Aflora en el cauce del río Colca, cerca de la localidad de Cabanaconde, sector noroeste, y se prolonga hacia el cuadrángulo de Huambo, en la Cordillera Occidental se pudo identificar a la formación Cachíos muy cerca de Pisacpicho y Tisco. Los afloramientos observados por Jacay et al (2006), ubicados a ambos márgenes del valle medio del río Majes, entre Uraca y Aplao manifiestan que alcanzan un espesor de aproximadamente 500m.

Litológicamente se compone de lutitas negras que se intercalan con delgados niveles de areniscas cuarzo-feldespática, en la parte media superior de este afloramiento se puede distinguir estructuras de deslizamiento representado por olistolitos de dimensiones menores, fallas normales sinsedimentarias abiertas hacia el E y SSE y estructuras de slumps. La intercalación con estratos cada vez más potentes de areniscas cuarzosas indica el inicio de la formación Labra.

### **Formación Labra**

A diferencia con la formación Puente estos sedimentos detríticos poseen un mayor contenido de granos de cuarzo, en el borde oeste de la Cordillera Occidental ocupa la mayor extensión de los afloramientos del grupo Yura, mientras que en la Cordillera Occidental los afloramientos están ligados a fallas de dirección NO-SE, en el área de estudio se tiene afloramientos restringidos en el valle disectado por el río Colca en las localidades de Madrigal y Lari.

Litológicamente en este sector está conformado por una gruesa sucesión de areniscas blanquecinas de grano media a fino con laminaciones oblicuas curvas y horizontales de grano fino a grueso, intercaladas con niveles de lutitas negras y grises, que forman secuencias grano y estrato crecientes.

### **Formación Gramadal**

La formación Gramadal sobreyace a la formación Labra de forma progresiva e infrayacen a la formación Hualhuani de forma progresiva; afirmación hecha en base al cambio litológico observable en toda la cuenca hidrográfica Camaná-Majes-Colca. Los afloramientos correspondientes a esta unidad se caracterizan por su continuidad y espesor continuo aproximado de 150m en medio de dos formaciones espesas conformadas principalmente por areniscas cuarzosas.

La formación Gramadal está constituida principalmente por la intercalación de areniscas cuarzosas de grano medio a fino, bien estratificadas y con laminación oblicua curva de canal, ripples de doble dirección y abundantes restos de troncos y hojas. Estas areniscas están intercaladas con niveles de espesores variables de limonitas y lutitas de color gris oscuro, además de la presencia de delgados bancos de calizas características de esta formación.

### **Formación Hualhuani**

Esta formación corresponde a la última secuencia considerada dentro del grupo Yura. Litológicamente está conformada por areniscas cuarzosa (cuarcita) blanquecinas de grano medio, redondeado a subredondeado, laminación oblicua curva de canal, ripples, restos de plantas y concreciones de Fe. También se observan laminaciones oblicuas rectas de barras arenosas. La configuración litológica y el medio de sedimentación en el que fue depositada no varían, puesto que siempre se conservan laminaciones oblicuas curvas de canal y barras arenosas progresivas que indican ríos arenosos distales.

Caldas (1993), menciona que en el cuadrángulo de Huambo, la formación Hualhuani, es la unidad más competente del grupo Yura, consiste en capas gruesas de areniscas cuarzosas que por efectos de erosión diferencial constituyen farallones espectaculares.

#### **2.2.4 Formación Murco**

Jenks (1948), hace mención al poblado de Murco, situado al norte de Cincha para describir por primera vez rocas correspondientes a la formación Murco. Benavides (1962) levanto en esta localidad una columna estratigráfica con 296 m de espesor. La mayor cantidad de afloramientos de esta unidad estratigráfica se halla en el dominio morfoestructural del borde oeste de la Cordillera Occidental, dentro del cuadrángulo de Huambo.

Caldas (1993) divide a la formación Murco en tres miembros, los que están diferenciados por su litología. La base conformada por calizas, areniscas feldespáticas y lutitas rojas (100m). El miembro medio conformado por grauvacas intercaladas con areniscas conglomerádicas y capas delgadas de arenisca de grano fino (120m).

Finalmente, Caldas (1993)., describe al miembro superior de la formación Murco con 80 a 90m de espesor conformado por areniscas grises de estratificación cruzada, que pasan a limolitas y lutitas rojas a violáceas que alternan con bancos de yeso de aspecto sacaroideo con espesores que alcanzan hasta 2 m.

Por su contenido litológico de limolitas, arcillas, calizas y yesos que son materiales que favorecen al despegue de las fallas, esta formación siempre se encuentra asociado o ligado al sistema de fallas Cincha-Lluta-Incapuquio formando pliegues y cabalgamientos importantes. Hidrogeológicamente se comporta como una barrera impermeable que impide la circulación de las aguas subterráneas.

#### **2.2.5 Formación Arcurquina**

Consiste de una secuencia de calizas gris oscuras con lentes y concreciones de chert, intercaladas con dolomías, margas y algunos horizontes de lutitas. Se observa afloramientos restringidos al SO del complejo volcánico Ampato-Sabancaya.

#### **2.2.6 Formación Huanca**

Sus afloramientos se encuentran confinados al sector SO del complejo volcánico Ampato-Sabancaya y se presenta a manera de una faja entre la formación Arcurquina y el volcánico Tacaza. Litológicamente está conformado de conglomerados de clastos cuarcíferos en matriz arcósicas intercalado con niveles delgados de areniscas arcósicas marrón rojizas de grano medio a grueso de poca compacidad.

#### **2.2.7 Grupo Tacaza (+- 1000 m)**

El término Volcánicos Tacaza, fue empleado por primera vez por JENKS, (1948), siendo publicado formalmente por NEWELL (1949), describiendo una gruesa acumulación de rocas volcánicas en las proximidades de la Mina Tacaza en el cuadrángulo de Lagunillas. Dávila (1988) considera que el grupo Tacaza está conformado por las formaciones Orcopampa e Ichocollo.

Los afloramientos del grupo Tacaza principalmente están ubicados en la parte noreste de la cuenca hidrográfica Camaná-Majes-Colca, este grupo aflora en ambos márgenes del río Colca dentro del dominio de la Cordillera Occidental, abarcando los poblados de Chihuay, Tuti, Callali, Sibayo, Pisacpicho, Tisco, Coyto, Catacota, Llacto, y Collpacapilla. Sobreyace en discordancia angular al grupo Yura y a la Formación Arcurquina. Se encuentra aflorando sobre

el grupo Yura en evidente discordancia angular e infrayaciendo al grupo Barroso. Los afloramientos ubicados en el extremo NO de la cuenca hidrográfica están distribuidos ampliamente entre los poblados de Quihuar, Pallca, Achaco, Yanasanja, Arcata, Hda. Talta, Hujuyo y Pallacla.

La secuencia descrita por Palacios et al., (1993) para el Grupo Tacaza en el valle del Colca, cuadrángulos de Chivay y Callalli, está conformado por brechas, tobas de bloques con lavas andesíticas cerca al tope, 200 m. de calizas silicificadas sin fósiles, fangolitas rojas, con ondulación laminada y areniscas de grano fino a grueso. También hay secuencias de tobas lapillíticas bien estratificadas en la parte más baja del Valle del Colca. Lavas con augita y olivino porfirítico son dominantes, con plagioclasas, las cuales están notablemente alteradas. Pasando al NE del valle del Colca Palacios et al., (1993) menciona que hay dominio de bloques de tobas en las regiones de Sibayo y Huaccoto en el cuadrángulo de Condorama. Más al N alrededor de Tisco se encuentra una secuencia de sedimentos lacustres en el tope de la sucesión; estas consisten de calizas delgadas, laminadas, blancas a gris pálido, gris verdoso oscuro, tobas lapillíticas gruesas y finas, algunos bloques de tobas y areniscas tobáceas, con capas conglomerádicas delgadas, las cuales contienen clastos principalmente de andesita.

De acuerdo a la relación que hace Dávila (1988), que describe que la Formación Orcopampa corresponde a la base del Grupo Tacaza y menciona que está constituido por 03 miembros. En términos generales el miembro A es de origen sedimentario, con estratificación somera, está constituido por areniscas, brechas y lavas grises, verdosas y violáceas, de composición generalmente andesítica. Tiene un espesor promedio de 1,000 m. Le sigue el miembro B conformada por bancos de 1 a 3 m. de tobas y conglomerados tobáceos, cremas o amarillentos y compactos; entre ellos se observa escasos niveles de areniscas tobáceas y verdosas; tiene un espesor aproximado de 300 m. El último miembro C de la Formación Orcopampa está constituido por areniscas gris verdosas a violáceas de grano fino a medio, con fragmentos de naturaleza volcánica y estratificación laminar. Hacia la base, se observan areniscas finas y limolitas amarillentas a rojizas, con intercalaciones de lavas afíricas, gris oscuras. El espesor de este miembro se estima en más o menos 1,000 m. En cambio, Caldas (1993) considera a la Formación Orcopampa fuera del grupo Tacaza. La formación Ichocollo, que fue considerado por Dávila (1988) como la última etapa del vulcanismo Tacaza, fundamentalmente está constituida por lavas y domos dacíticos, en la base, así como por lavas andesíticas a andesítico-basálticas, en la parte superior; las lavas son gris a gris oscuras, afíricas y porfiríticas, a través de toda la secuencia se observa niveles areniscosos y brechas andesíticas

Todas estas formaciones en el presente trabajo lo consideraremos únicamente como Grupo Tacaza que de acuerdo a los trabajos recientes de determinaciones de los arcos volcánicos (Mamani et al., 2012) se considera que durante el Oligoceno se produjo el vulcanismo del Grupo Tacaza, pero, a este grupo se separó la parte media y superior de la Formación Orcopampa que corresponderían a secuencias pertenecientes a la Formación Huaylillas. (MAF-2.2-15).

### **2.2.8 Grupo Barroso (+/- 1 200 m)**

Los depósitos volcánicos del Grupo Barroso (Plioceno-Pleistoceno) anteriormente, agrupados a diferente formaciones o grupos como Puto Puto, Ampí, Patapampa, Sencca, Jatunpampa. En el

presente trabajo estas formaciones han sido asociadas a diferentes estructuras volcánicas tales como: Sabancaya, Ampato, Hualca Hualca. Las Minas, Mismi, Anccasi, Ananta, Huarancante y Jollo Jello. Sus depósitos han sido agrupados en base a su morfología y naturaleza (dinámica eruptiva). En el área de estudio las estructuras volcánicas asociadas a este grupo, corresponde a las del complejo volcánico Ampato – Sabancaya y al del estratovolcán Hualca Hualca, (MAF-2.2-15).

### **Complejo Volcánico Mismi**

Sus depósitos fueron agrupados en tres eventos: El primer evento (Np-cvm/an1), consiste de flujos de andesitas porfiríticas que se extienden hacia el sur del complejo y sobreyacen a depósitos del Tacaza indiviso. El segundo evento (Np-cvm/an2), se trata de andesitas aféricas vesiculadas que se localizan en la cumbre, no son muy fluidas. El tercer evento (Qpl-cvm/tbk), consiste de tobas de cristales no soldadas, antes denominadas formación Puto Puto que se localizan hacia el sur del complejo, rellenando parte del valle del río Colca o quedando como remanentes colgados (túnel de Maca); se tiene una datación radiométrica de  $1,1 \pm 0,5$  Ma, método K/Ar en roca total (KLINCK et al., 1986), lo que permite asignar a esta unidad una edad plio–pleistocénica.

### **Estratovolcán Las Minas**

Sus depósitos fueron agrupados en dos eventos: El primer evento (Np-mi/tbk), consiste de tobas de cristales cubiertos por algunos niveles piroclásticos que se han canalizado a lo largo del río Aycata, extendiéndose hacia el sur. El segundo evento (Qpl-mi/an), consiste de flujos de andesita basáltica, que se extienden hacia el sur (hoja de Arequipa), donde se tiene una datación radiométrica de  $1,3 \pm 0,3$  Ma, método K/Ar en roca total (OLADE, 1980), lo que permite asignar a este estratovolcán una edad plio-pleistocénica. El estratocono se encuentra truncado en la parte superior, lo que sugiere que posiblemente sea la morfoestructura resultante de una caldera de explosión, cuyos depósitos piroclásticos se localizan hacia el oeste (cuadrángulo de Callalli, 32-t).

### **Complejo Volcánico Hualca Hualca**

Localizado en el sector noroeste de la hoja. Sus depósitos han sido agrupados en seis eventos: *El primer evento* (Qpl-hh/tqa), consiste de flujos de lavas traquiandesíticas que se extienden hacia el este del complejo, cubriendo discordantemente a los depósitos del Tacaza indiviso y a las tobas soldadas del complejo volcánico Huarancante.

*El segundo evento* (Qpl-hh/an1), consiste de flujos de andesita intercalados con tobas cristalolíticas, ambos forman la base del complejo volcánico, se extienden hacia el este y oeste, cubriendo a los depósitos del Tacaza indiviso.

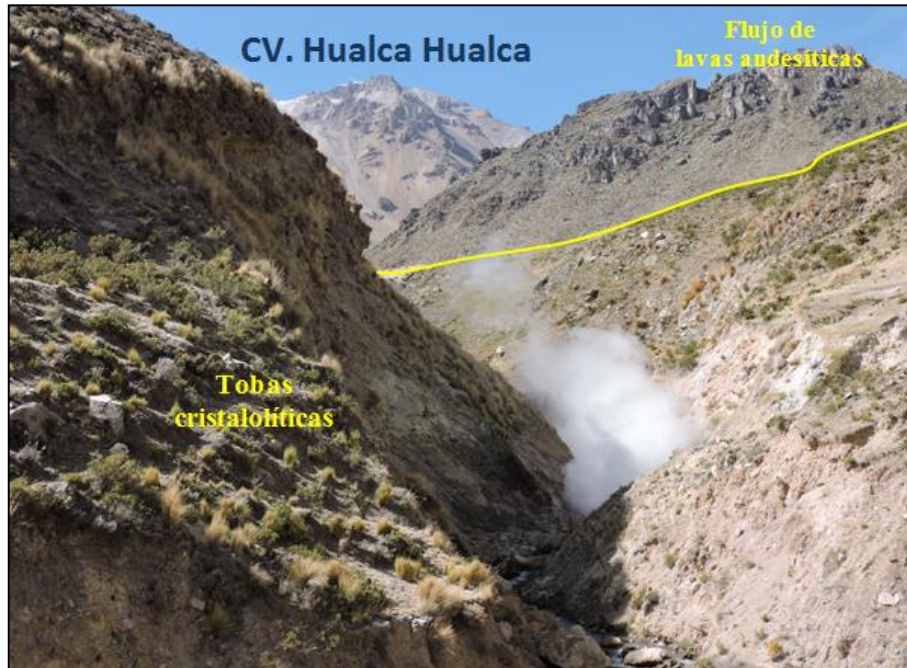
*El tercer evento* (Qpl-hh/an2), consiste de flujos de andesita porfirítica, que se extienden hacia el flanco sur, infrayaciendo a los depósitos del estratovolcán Sabancaya.

*El cuarto evento* (Qpl-hh/an3), consiste de flujos andesíticos aféricos a porfiríticos de la cumbre.

*El quinto evento* (Qpl-hh/da), consiste de domos y flujos dacíticos posteriores, el emplazamiento de este domo (criptodomo) originó el colapso del flanco norte del complejo, por lo que se emplazaron depósitos de avalanchas de escombros hacia el río Colca y hacia Cabanaconde, originando una caldera de colapso (DÁVILA y LÓPEZ, 1991), estos depósitos conforman.



El sexto evento (Qpl-hh/dae) que taponaron las aguas del río, creando un represamiento aguas arriba con posterior sedimentación de depósitos lacustrinos (Madrigal, Maca). Cerca de este domo se localizan manifestaciones geotermales (surgente de gas de Pinchollo) y alteraciones hidrotermales, (Figura 2.3).



**Figura N° 2.3** Flujos andesíticos intercalados con tobas cristalolíticas, del segundo evento del complejo volcánico Hualca Hualca. Vista al S.

### **Estratovolcán Ampato**

Localizado en el sector este del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Sus depósitos han sido agrupados en siete eventos.

*El primer evento* (Qpl-eva/tbka), consiste de tobas soldadas vitrificadas que se extienden hacia el sureste, cubriendo discordantemente a las calizas Arcurquina y a los conglomerados Huanca, se prolongan al cuadrángulo de Huambo (32-r), y hacia el noreste, infrayaciendo a las tobas del estratovolcán Sabancaya.

*El segundo evento* (Qpleva/av), consiste de flujos de andesitas vesiculadas porfiríticas localizadas hacia el sureste.

*El tercer evento* (Qpl-eva/tqa), consiste de flujo lávicos traquiandesíticos, con cristales macroscópicos de plagioclasa, estos depósitos forman la base del estratocono.

*El cuarto evento* (Qpl-eva/dae), consiste de depósitos de avalanchas de escombros que sugieren el colapso parcial del flanco sureste del estratocono. Se localizan en el piedemonte sureste donde se reconocen sus geoformas características de pequeñas colinas cónicas (hummocks). El colapso puede haber sido gravitacional, al reconocer un alineamiento estructural en dicho flanco de dirección noroeste.

*El quinto evento* (Qpl-eva/dp), consiste de flujos de dacitas porfiríticas que atestiguan nuevamente la formación del flanco.

*El sexto evento* (Qpl-eva/tbk), consiste de tobas de cristales no soldadas que se emplazan en las depresiones preexistentes, antes denominada formación Jatunpampa, dichos depósitos

indican la formación de una caldera de explosión en la cumbre, de 3 x 2 km de dimensiones, alargada hacia el noroeste.

*Séptimo evento* (Qpleva/da) consiste de flujos de dacitas de la cumbre que cubren a la caldera formada en el evento anterior, y atestiguan la continua formación del estratocono.

### **Estratovolcán Sabancaya**

Localizado en el sector este de la hoja y hacia el norte del estratovolcán Ampato. Sus depósitos han sido divididos y agrupados en cuatro eventos.

*El primer evento* (Qpl-evs/tbka), consiste de tobas soldadas vitrificadas que se extienden hacia el este del cono y rellenan una depresión preexistente, sobreyacen a las tobas del primer evento del estratovolcán Ampato.

*El segundo evento* (Qpl-evs/da1), consiste de flujos dacíticos fluidales, cuyos frentes son muy conspicuos y cubren a las tobas del sexto evento del Ampato, extendiéndose por lo tanto hacia el sureste.

*El tercer evento* (Qpl-evs/da2), consiste de flujos dacíticos a traquiandesíticos que forman los flancos del estratocono, cubriendo a los depósitos preexistentes del Ampato y Hualca Hualca.

*El cuarto evento* (Qplevs/da3), consiste de domos de flujos dacíticos afíricos en la cumbre, con los que finalizó la construcción del estratocono, se extienden principalmente hacia el norte. En los alrededores del Sabancaya, se han reconocido depósitos de ceniza correspondientes al período de actividad volcánica (1985-1993), sin embargo al ser poco gruesos ( $\pm 5$  cm) no fueron cartografiados.

### **2.2.9 Grupo Andahua**

En el valle del río Colca en la localidad de Chivay, se reconocen unos domos y flujos andesíticos a traquiandesíticos afaníticos muy vesiculados, anteriormente conocidos como formación Inca. A estos depósitos se los correlaciona al grupo Andahua por ser más de carácter regional y al no poder asociarlos a alguna estructura volcánica importante, (MAF-2.2-15).

Litológicamente se trata de flujos andesíticos a traquiandesíticos afaníticos vesiculares. Se tiene dataciones radiométricas, método K/Ar en roca total de  $0,4 \pm 0,1$  Ma (OLADE, 1980),  $0,23 \pm 0,05$  Ma y  $0,095 \pm 0,009$  Ma (KANEOKA y GUEVARA, 1984); que sugieren un período de emplazamiento en el Pleistoceno.

### **2.2.10 Depósitos fluvioglaciares**

Estos depósitos se han originados por la actividad glacial y aluvial durante el Plioceno y Pleistoceno, se han acumulado sobre la superficie irregular entre 3 500 a 6 300 msnm, producto de la erosión de los aparatos volcánicos pertenecientes al grupo Barroso y de los volcánicos recientes identificado al SE y SO del área de estudio. Su litología está compuesta por una mezcla heterogénea y heterométricos de clastos angulosos y subangulosos mal clasificados y de naturaleza volcánica soportados en una matriz areno arcillosa.

### **2.2.11 Depósito lacustrinos**

Estos depósitos se forman en los bordes de las lagunas, o lugares donde hay represamiento natural de aguas, depositándose sedimentos por decantación en zonas tranquilas o zonas

endorreicas. En la cuenca hidrográfica Camaná-Majes-Colca existen escasos depósitos lacustrinos, siendo el más representativo el ubicado a los bordes de la laguna Mucurca ubicado al sur de Cabanaconde. Estos depósitos están conformados por conglomerados y arcosas no consolidados, producto del acarreo de las aguas de lluvia directamente a una pequeña cuenca de 7 x 2 kms. El material que llega a esta laguna proviene de la erosión de las rocas volcánicas del arco reciente.

### **2.2.12 Depósitos Aluviales**

Corresponde al ambiente de deposición de sedimentos recientes con mayor presencia en la cuenca hidrográfica Camaná-Majes-Colca. Los depósitos de material aluvial están estrictamente restringidos a las quebradas donde discurre agua de manera continua o extemporánea. Los depósitos aluviales se encuentran como terrazas o superficies planas, a lo largo de los ríos principales que discurren de NE a SO generalmente, transportando material desde la Cordillera Occidental hacia las partes bajas de las Pampas Costaneras y al mar a través del río Camaná. Este río y sus tributarios corresponden al principal drenaje de la cuenca. La litología de los depósitos aluviales varía según la posición de los afloramientos; en las partes altas de los ríos, está conformado por bloques, y conglomerados redondeados a subangulosos heterogéneos, heterométricos e inconsolidados en una matriz arenosa gruesa. Los ríos tributarios forman abanicos con material clasificado así como flujos de lodo y de escombros (mud flow, Debris flow) formando terrazas a lo largo de las quebradas principales. Algunos depósitos aluviales tienen espesores que alcanzan las decenas de metros, convirtiéndose en importantes acuíferos.

### **2.2.13 Depósitos Coluviales**

Estos depósitos que se encuentran al pie de las escarpas de las laderas de los cerros como material de escombros, constituidos por gravas y bloques sub-angulosos con matriz arenosa y limosa.

### **2.2.14 Rocas Intrusivas**

#### **Súper Unidad Tiabaya**

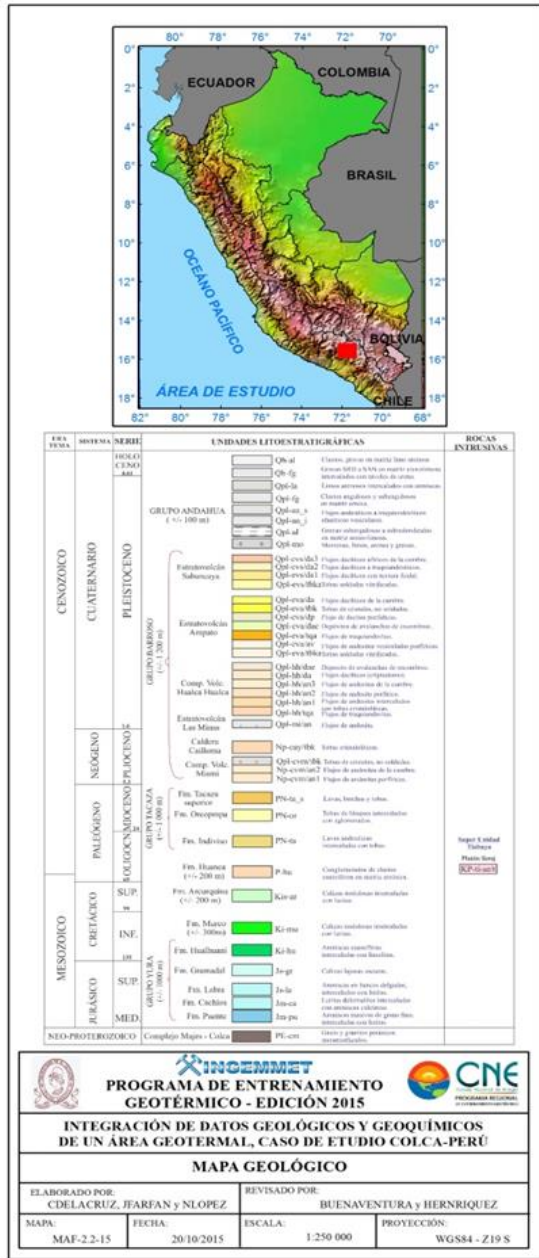
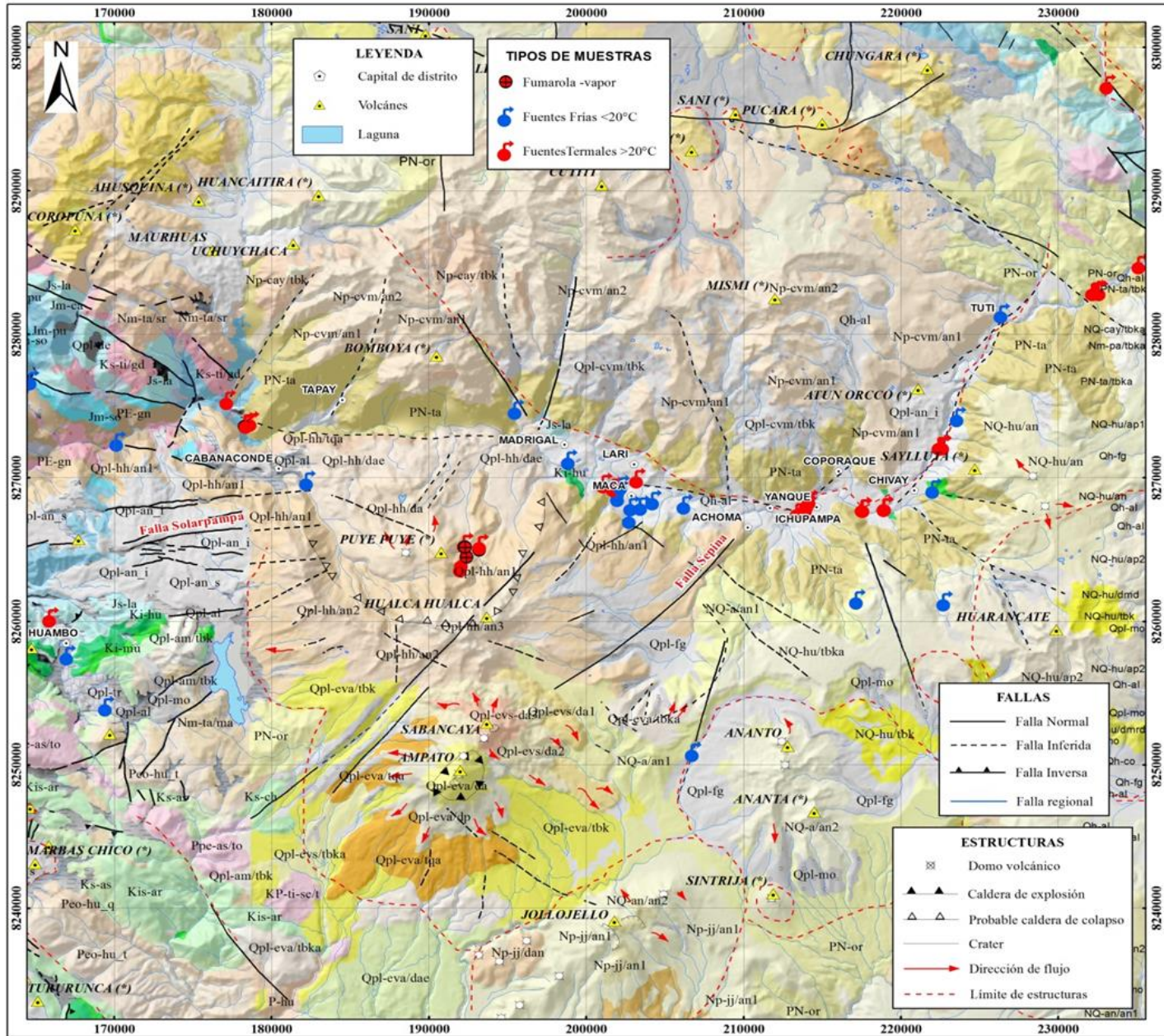
Estudiado inicialmente en el área de Arequipa por Jenks & Harris (1953), denominándolo granodiorita Tiabaya. Esta súper unidad corresponde al arco magmático Toquepala (75-55 Ma) que está representado por una serie de afloramientos ubicados específicamente en el dominio morfoestructural del borde oeste de la Cordillera Occidental (Figura N° 2.4). Aflora en dos grandes grupos 1) ligado esencialmente al sistema de fallas Cincha-Lluta-Incapuquio entre los poblados de Chuquibamba, Acoy y los volcanes Tororunca, Honda. 2) ligado al sistema de fallas NE-SO y E-O, ubicado entre los poblados de Sucna, Choco y Cabanaconde. Estas rocas que esencialmente son granodioritas y tonalitas intruyen a las rocas sedimentarias del Jurásico y a la súper unidad Torconta, incluyendo a las rocas metamórficas. Estos cuerpos son de composición félsica a intermedia y generalmente tienen xenolitos de rocas máficas.

Los cuerpos pertenecientes a la súper unidad Tiabaya están afectados por el sistema de fallas Cincha-Lluta-Incapuquio, el sistema de fallas Iquipi y el sistema de fallas NE-SO; en menor medida son afectados por las fallas de dirección N-S. Se produjo en la roca un fracturamiento moderado que proporcionó a estos cuerpos condiciones de transmisión de agua por las fracturas. Se considera como acuitardo.

ERA TEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS			ROCAS INTRUSIVAS
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLO CENO 0.01	GRUPO ANDAHUA (+/- 100 m)	Qh-al	Clastos, gravas en matriz limo arenosa	
		Qh-fg		Gravas SRD a SAN en matriz arenolimososa intercalados con niveles de arena.		
		Qpl-la		Limos arenosos intercalados con areniscas.		
		Qpl-fg		Clastos angulosos y subangulosos en matriz arcillosa.		
		Qpl-an_s		Flujos andesíticos a traquiandesíticos afaníticos vesiculares.		
		Qpl-an_i		Flujos andesíticos a traquiandesíticos afaníticos vesiculares.		
		Qpl-al		Gravas subangulosas a subredondeadas en matriz areno-limososa.		
		Qpl-mo		Morrenas, limos, arenas y gravas..		
		Estratovolcán Sabancaya		Qpl-evs/da3	Flujos dacíticos aféricos de la cumbre.	
				Qpl-evs/da2	Flujos dacíticos a traquiandesíticos.	
				Qpl-evs/da1	Flujos dacíticos con textura fuidal.	
				Qpl-evs/tbka	Tobas soldadas vitrificadas.	
Estratovolcán Ampato	Qpl-eva/da	Flujos dacíticos de la cumbre.				
	Qpl-eva/tbk	Tobas de cristales, no soldadas.				
	Qpl-eva/dp	Flujo de dacitas porfíricas.				
	Qpl-eva/dae	Depósitos de avalanchas de escombros..				
	Qpl-eva/tqa	Flujos de traquiandesitas.				
	Qpl-eva/av	Flujos de andesitas vesiculadas porfíricas.				
Comp. Volc. Hualca Hualca	Qpl-eva/tbka	Tobas soldadas vitrificadas..				
	Qpl-hh/dae	Deposito de avalanchas de escombros.				
	Qpl-hh/da	Flujos dacíticos (criptodomo).				
	Qpl-hh/an3	Flujos de andesitas de la cumbre.				
	Qpl-hh/an2	Flujos de andesita porfírica.				
Estratovolcán Las Minas	Qpl-hh/an1	Flujos de andesitas intercalados con tobas cristalolíticas.				
	Qpl-hh/tqa	Flujos de traquiandesitas.				
	Qpl-mi/an	Flujos de andesita.				
NEÓGENO	PLIOCENO	GRUPO BARROSO (+/- 1 200 m)	Caldera Cailloma	Np-cay/tbk	Tobas cristalolíticas.	
			Comp. Volc. Mismi	Qpl-cvm/tbk	Tobas de cristales, no soldadas.	
			Np-cvm/an2	Flujos de andesitas de la cumbre.		
PALEÓGENO	OLIGOCENO	GRUPO TACAZA (+/- 1 000 m)	Fm. Tacaza superior	PN-ta_s	Lavas, brechas y tobas.	Super Unidad Tiabaya Plutón Seraj KP-ti-sc/t
			Fm. Orcopmpa	PN-or	Tobas de bloques intercalados con aglomerados.	
			Fm. Indiviso	PN-ta	Lavas andesíticas intercaladas con tobas.	
			Fm. Huanca (+/- 200 m)	P-hu	Conglomerados de clastos cuarcíferos en matriz arcósica.	
MESOZOICO	CRETÁCICO	GRUPO YURA (+/- 1000 m)	Fm. Arcurquina (+/- 200 m)	Kis-ar	Calizas nodulosas intercaladas con lutitas.	
			Fm. Murco (+/- 300m)	Ki-mu	Calizas nodulosas intercaladas con lutitas.	
			Fm. Hualhuani	Ki-hu	Areniscas cuarcíferas intercaladas con limolitas.	
			Fm. Gramadal	Js-gr	Calizas lajosas oscuras.	
	JURÁSICO	SUP.	Fm. Labra	Js-la	Areniscas en bancos delgados, intercalados con lutitas.	
		INF.	Fm. Cachíos	Jm-ca	Lutitas deleznales intercaladas con areniscas calcáreas.	
		SUP.	Fm. Puente	Jm-pu	Areniscas masivas de grano fino, intercaladas con lutitas.	
		MED.				
NEO-PROTEROZOICO		Complejo Majes - Colca	PE-cm	Gneis y granitos potásicos metamorizados.		

Figura N° 2.4 Columna estratigráfica del área geotermal Sabancaya-Ampato-Hualca Hualca.

“Integración de datos geológicos y geoquímicos de un área geotermal, caso de estudio Colca-Perú”



MAF-2.2-15. Mapa geológico del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

## **2.3 GEOLOGIA ESTRUCTURAL**

Se hace una breve descripción de las principales sistemas estructurales a partir del mapa geológico y de la fotointerpretación de lineamientos en base a una imagen satelital Landsat TM, empleando la combinación de bandas 432; permitieron identificar e inferir nuevas estructuras.

En el área de estudio se han identificado tres sistemas estructuras de fallas y/o lineamientos, que se encuentran controlados por la convergencia oblicua entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Estos sistemas son:

- Sistema de fallas de dirección NO-SE ubicados en el dominio de la Cordillera Occidental.
- Sistema de fallas NE-SO o Transversal a los andes (Acosta et al., 2012).
- Sistema de fallas E-O.

Lo resaltante de las estructuras heredadas en el aspecto geomorfológico, es que se comportan como límites de las grandes unidades morfoestructurales. En la figura 2.5 apreciamos una distribución sectorizada de los sistemas de fallas, debido esencialmente a la migración de esfuerzos hacia el NE a la actual Cordillera Occidental, donde se encuentran las fallas más recientes en términos geológicos. Haremos una breve descripción de estos grandes sistemas de fallas tomando en cuenta esencialmente la naturaleza y características que las agrupan y relacionan entre sí.

### **2.3.1 Sistemas de fallas de dirección NO-SE**

Este sistema de fallas e encuentra distribuido al sur del volcán Ampato y está afectando rocas del sustrato emplazados entre el Jurásico (Grupo Yura) y Mioceno (Ignimbritas). Unas de las estructuras más importantes es la falla Huanca, que es del tipo normal, con buzamiento hacia el SO y con una longitud aproximada de la traza de falla de 50 Km. También se han observado algunas fallas en el sector NE del área de estudio, de comportamiento normal que buza hacia el SO, posee cerca de 25 Km de largo y pasa cerca de la Localidad de Yanque.

### **2.3.2 Sistema de fallas NE-SO trasversales a la cordillera**

Se trata de una serie de lineamientos y fallas que atraviesan por todos los dominios morfoestructurales en la cuenca del río Camaná-Majes-Colca. En el área de estudio ha sido reconocido principalmente al NE del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, en la zona de la Pampa Sepina. Este sistema, constituido básicamente de fallas identificados por Rodríguez y Huamán (1992), y poseen una longitud aproximada de 35 Km y son muy activas.

Este sistema controla la formación de dos grandes valles glaciares, situados al O del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, que tienen esta dirección. Asimismo, el mapa geológico del complejo volcánico Ampato-Sabancaya, muestra que los centros de emisión de este complejo volcánico, se encuentran alineados en dirección NE-SO y por tanto pueden estar controlados por este sistema de fallas.

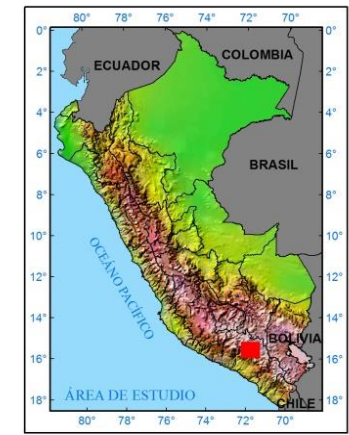
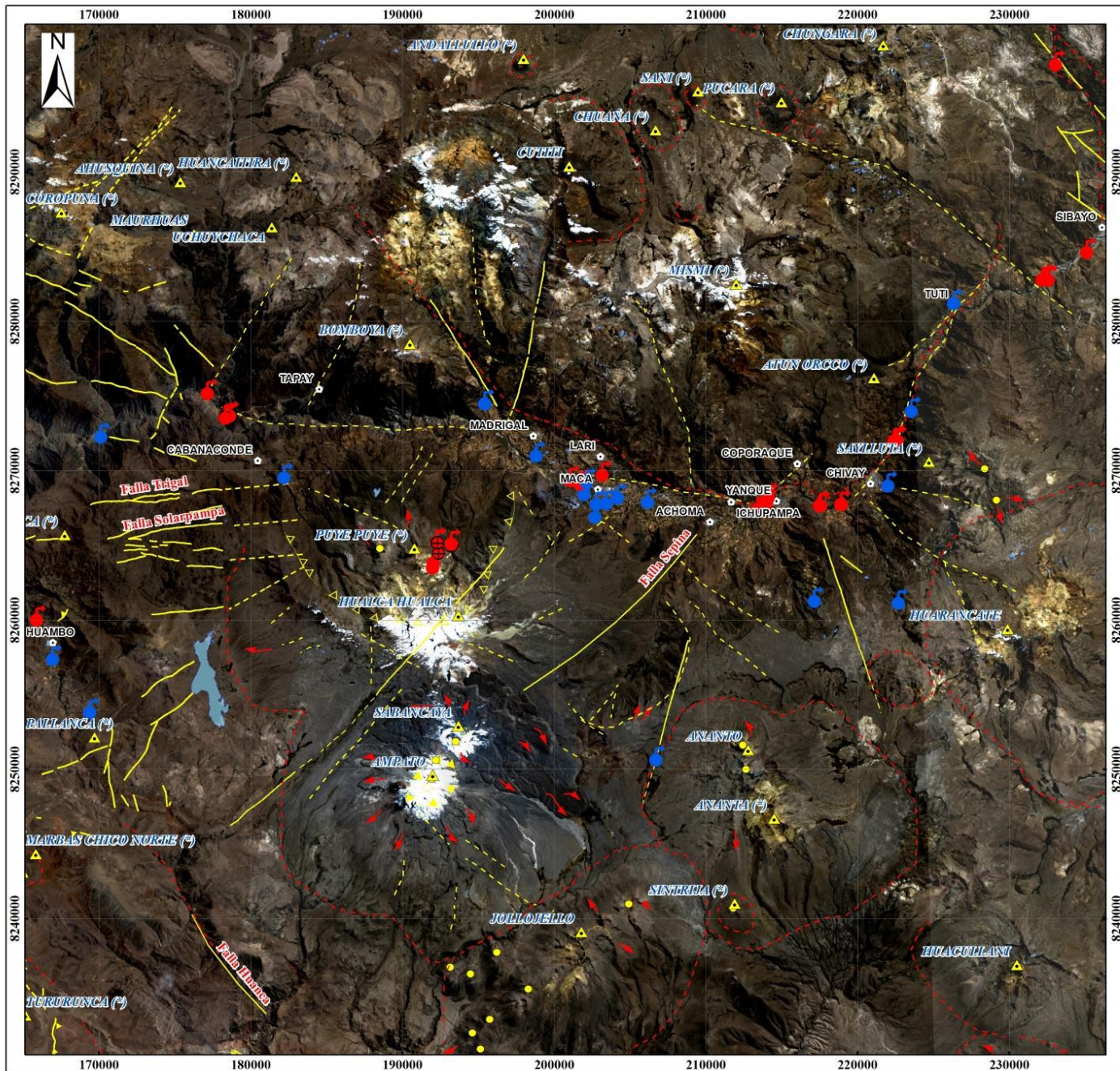
### **2.3.3 Sistema de fallas E - O**

El sistema E-O se observa principalmente al norte de la zona de estudio, entre el volcán Hualca Hualca y el cañón del Colca. Está conformado principalmente por fallas normales activas (Mering et al., 1996; Huamán, 1995), que afectan flujos de lavas del volcán Hualca Hualca.

Estas fallas son conocidas como el sistema Huambo-Cabanaconde, y están conformadas por la fallas Trigal y Solarpampa. Las fallas buzanan hacia el sur con valores entre 60° y 70° (Sebrier et al., 1985), presentan longitudes de hasta 12 km y se han observado espejos de falla de hasta 30 m de alto.

Estos lineamientos tienen relación con los domos monogenéticos Andahua y Puye Puye y con el estratovolcán Hualca Hualca, siguiendo esta dirección hasta alcanzar al volcán Saylluta y corta rocas volcánicas muy recientes, lo que indica que este sistema de fallas sufrió muchas reactivaciones a lo largo de la historia geológica.

“Integración de datos geológicos y geoquímicos de un área geotermal, caso de estudio Colca-Perú”



<b>TIPOS DE MUESTRAS</b>		<b>LEYENDA</b>	
	Fumarola -vapor		Capital de distrito
	Fuentes Frias <20°C		Volcánes
	Fuentes Termales >20°C		Laguna
<b>ESTRUCTURAS</b>		<b>FALLAS</b>	
	Domo volcánico		Falla Normal
	Caldera de explosión		Falla Inferida
	Probable caldera de colapso		Falla Inversa
	Crater		Falla regional
	Dirección de flujo		
	Límite de estructuras		

<b>PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO GEOTÉRMICO - EDICIÓN 2015</b>			
<b>INTEGRACIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS Y GEOQUÍMICOS DE UN ÁREA GEOTERMAL, CASO DE ESTUDIO COLCA-PERÚ</b>			
<b>MAPA ESTRUCTURAL</b>			
ELABORADO POR: CDELACRUZ, J.FARFAN y NLOPEZ		REVISADO POR: BUENAVENTURA y HERNRIQUEZ	
MAPA: MAF-03-15	FECHA: 20/10/2015	ESCALA: 1:250 000	PROYECCIÓN: WGS84 - Z19 S



## **2.4 ALTERACIONES HIDROTERMALES**

Las técnicas de teledetección y, concretamente, de imágenes de satélite multispectrales han sido utilizadas en numerosos trabajos geológicos y estructurales. La utilización de imágenes Landsat se debe a las importantes ventajas que presentan frente a otros sensores remotos y en la actualidad estas imágenes es de libre disposición en la página de la USGS (<http://glovis.usgs.gov/>).

Actualmente el mapeo de alteración, es posible con sensores que pueden detectar la presencia de grupos de minerales característicos de las zonas de alteración, con base en los rasgos espectrales de los mismos en la parte visible e infrarrojo cercano (0.4-1.1  $\mu\text{m}$ ) del espectro electromagnético. Dispositivos, como Landsat TM, pueden discriminar entre diferentes litologías y mapear la distribución de diferentes grupos de minerales como arcillas, sulfatos, carbonatos y óxidos.

Para la discriminación de zonas con alteración hidrotermal (arcillas + óxidos) dentro del área de estudio, se hizo mediante el tratamiento de imágenes satelitales Landsat 8 TM tomados en setiembre del 2014. Es necesario recalcar que, el área se ubica en el en la zona de traslape de dos escenas y no fueron verificados en campo.

El área de mayor interés donde se tiene alteración de arcillas + óxidos se encuentra en el complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca; en el estratovolcán Hualca Hualca cubierto por una capa de nieve; y en alrededores de la localidad de Puye Puye. (Figura N° 2.6).



**Figura N° 2.5** Alteración hidrotermal y manifestaciones fumarólicas. Vista al S de Puye Puye.

En Puye Puye la alteración de arcillas + óxidos cubre un área de 13.7 Km<sup>2</sup> y se encuentra expuesta sobre flujos de andesitas intercalados con tobas cristalolíticas, donde se tienen manifestaciones fumarólicas y de fuentes termales.

En el estratovolcán Ampato se tiene pequeñas áreas de alteración de arcillas y óxidos bordeando al nevado, lo que significaría que también se encuentran cubiertos por nieve, estas alteraciones se relacionan con flujos dacíticos del último evento de formación. Así mismo a lo largo del valle del río Colca se observa estos tipos de alteración que se encuentran relacionados a los volcánicos Tacaza y a depósitos aluviales cuaternarios acumulados durante el mega deslizamiento del flanco norte del estratovolcán Hualca Hualca, (MAF-2.4-15).

En el mapa de anomalías (MAF-2.4-15) se observa importantes áreas con alteraciones hidrotermales asociados a flujos andesíticos y tobas del complejo volcánico Mismi y de la caldera Caylloma del Neógeno-Plioceno.



## **CAPITULO III HIDROGEOLOGÍA**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

El estudio hidrogeológico en el área geotermal de Colca tiene la finalidad de caracterizar a las unidades geológicas favorables para la formación de reservorios geotérmicos (acuíferos profundos) y de acuerdo a sus condiciones hidrogeológicas determinar los niveles o capas permeables e impermeables (capa sello) que condicionan su formación, así como identificar los patrones de flujo de agua subterránea preferenciales que rigen a partir de la infiltración y percolación en profundidad (sub-superficiales, poco profundos o profundos) y por ultimo identificar zonas de descarga y recarga.

De acuerdo a la configuración topográfica volcánica del área de estudio hacia las zona sub-superficiales las direcciones de flujo de agua subterránea obedecen a un flujo tipo radial (domos volcánicos) y a medida que van infiltrando se restringen a los patrones de dirección preferencial de los materiales permeables y de las estructuras geológicas (fallas).

Las aguas subterráneas en el subsuelo se encuentran ligadas a las condiciones geomorfológicas, a las estructuras, naturaleza de la roca, y las condiciones para su formación, generados por procesos muy diversos y sometidos a posterioridad a procesos de modificación endógena y exógena, estos factores configuran características propias del terreno que favorecen el almacenamiento y la circulación de las aguas subterráneas, así como su composición química e isotópica.

En su mayoría las surgencias de fuentes frías y termales (manantial termal y fumarolas) a superficie están asociadas a los diferentes sistemas de fallas que existen en el área de estudio, los mismos que podrían transportar a manera de conductos naturales los fluidos provenientes del contacto con la fuente de calor, relacionado al sistema volcánico activo

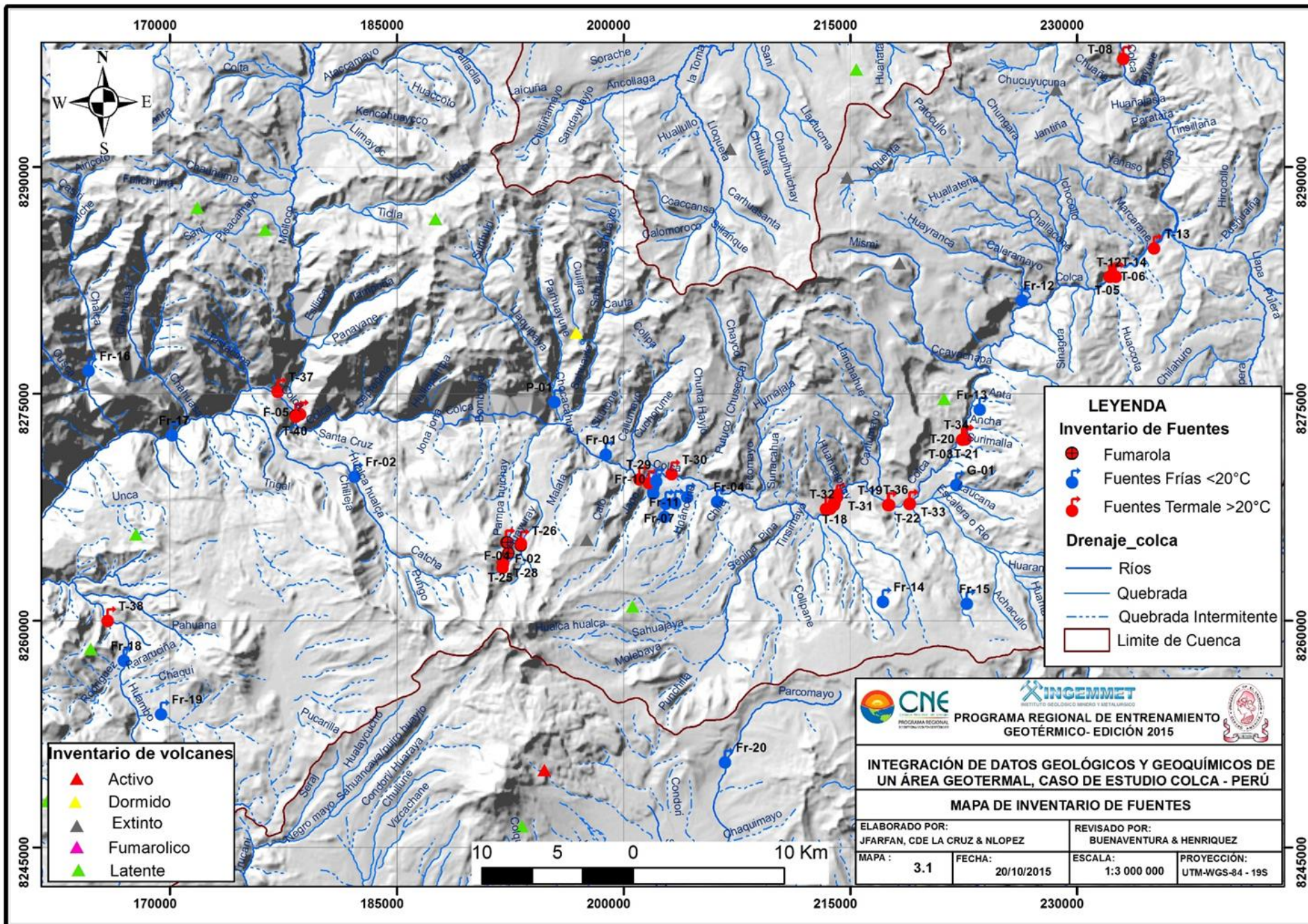
Los reservorios geotérmicos son parte de un sistema dinámico de interacción de diferentes componentes y dependen de factores como la precipitación, zona de alimentación o recarga, relieve, la red de drenaje, estructuras, parámetros hidrogeológicos (permeabilidad y porosidad) para su dinamismo.

### **3.2. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El inventario de fuentes frías y termales en el área de estudio viene ha ser el registro directo de la existencia de acuíferos y zonas preferenciales de descarga, los mismos que están relacionados a acuíferos superficiales o profundos (reservorio geotérmico). Los parámetros y medidas, consideradas para el trabajo de inventario de fuentes de agua subterránea son: código de identificación, ubicación geográfica coordenadas UTM (norte, este y altitud), ubicación política, parámetros físico-químicos (conductividad eléctrica, pH, TDS, temperatura y otros), parámetros hidráulicos (caudal), descripción del entorno y fecha de inventario (registro y muestreo). Se ha utilizado un código para el análisis las muestras.

En el área de estudio se identificó sesenta y siete tres (67) fuentes de agua subterránea de los cuales cuarenta (40) son fuentes termales cuyas temperaturas son superiores a 20 °C, veintidós (22) son fuente frías (manantiales, manantiales captados y puntos de control de quebradas) con

temperaturas menores a 20 °C y por último se tiene presencia de fumarolas (5) donde predomina la surgencia de vapor a superficie, ver mapa de inventario MAF 3.1-2015. Además de las 67 fuentes inventariadas se han muestreado 51 muestras para el análisis geoquímico y 23 muestras para análisis isotópicos ( $^{18}\text{O}$   $^2\text{H}$ ).



**LEYENDA**

**Inventario de Fuentes**


- Fumarola
- Fuentes Frías <20°C
- Fuentes Termale >20°C

**Drenaje\_colca**

- Ríos
- Quebrada
- - - Quebrada Intermittente
- Limite de Cuenca

**Inventario de volcanes**

- ▲ Activo
- ▲ Dormido
- ▲ Extinto
- ▲ Fumarolico
- ▲ Latente


**PROGRAMA REGIONAL DE ENTRENAMIENTO  
GEO TéRMICO - EDICIÓN 2015**

**INTEGRACIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS Y GEOQUÍMICOS DE  
UN ÁREA GEOTERMAL, CASO DE ESTUDIO COLCA - PERÚ**

**MAPA DE INVENTARIO DE FUENTES**

ELABORADO POR: JFARFAN, CDE LA CRUZ & NLOPEZ		REVISADO POR: BUENAVENTURA & HENRIQUEZ	
MAPA : 3.1	FECHA: 20/10/2015	ESCALA: 1:3 000 000	PROYECCIÓN: UTM-WGS-84 - 19S





**Figura N° 3.1 Fumarola Paclla ubicado en el valle del río Colca sector Paclla (fotografía tomada del Plan Maestro, 2010).**



**Figura N° 3.2 Fumarola Pinchollo en la quebrada Huayuray, y ladera del nevado Hualcahualca (fotografía tomada del Plan Maestro, 2010).**

**Cuadro 3.1 Inventario de Fuentes del Área de Estudio**

Nº	TIPO	CÓDIGO	NOMBRE	PARÁMETROS				FECHA	Muestreado y/o Inventariado
				HIDRÁULICOS Y FÍSICOQUÍMICOS					
				Q (l/s)	T °C	PH	CE µS/cm		
1	Fuente Termal	T-01	Rancho Alpaca	0.8	82.5	7.3	8617.0	10/11/2014	Inventariado
2	Fuente Termal	T-02	Calera 2	4.0	52.5	6.7	7753.0	16/11/2014	Inventariado
3	Fuente Termal	T-03	Calera 3	0.7	53.5	7.3	9037.0	16/11/2014	Inventariado
4	Fuente Termal	T-04	Puye II	0.5	69.0	6.9	8204.0	10/11/2014	Inventariado
5	Fuente Termal	T-05	Ipo 1	0.8	54.0	6.6	10320.0	11/11/2014	Inventariado
6	Fuente Termal	T-06	Ipo 3	1.2	50.0	6.8	3148.0	11/11/2014	Inventariado
7	Fuente Termal	T-07	Puye 1	4.5	75.5	6.9	6687.0	10/11/2014	Inventariado y Muestreado*
8	Fuente Termal	T-08	Mullahuata	0.7	59.8	6.4	38040.0	14/11/2014	Inventariado y Muestreado
9	Fuente Termal	T-09	Huallhualica 2	1.0	57.0	6.8	6434.0	14/11/2014	Inventariado
10	Fuente Termal	T-10	Chacapi 2	3.0	41.9	7.3	2259.0	10/11/2014	Inventariado
11	Fuente Termal	T-11	Sabancaya	1.5	74.0	7.6	8539.0	10/11/2014	Inventariado y Muestreado
12	Fuente Termal	T-12	Chancadora		38.4	6.7	7614.0	13/11/2014	Inventariado y Muestreado*
13	Fuente Termal	T-13	Baños del Inca	1.0	44.5	6.7	5720.0	11/11/2014	Inventariado y Muestreado*
14	Fuente Termal	T-14	Ipo 2	1.9	50.3	7.0	2961.0	11/11/2014	Inventariado y Muestreado*
15	Fuente Termal	T-15	Mismi	0.1	65.5	7.2	8042.0	10/11/2014	Inventariado y Muestreado*
16	Fuente Termal	T-16	Baños Chacapi	1.0	39.7	7.3	2354.0	10/11/2014	Inventariado y Muestreado*
17	Fuente Termal	T-17	Huallhualica 1	1.2	54.3	7.4	5731.0	14/11/2014	Inventariado y Muestreado*
18	Fuente Termal	T-18	Puye 2	1.2	78.0	7.1	8021.0	10/11/2014	Inventariado y Muestreado*
19	Fuente Termal	T-19	Huallhualica 3	3.0	77.1	7.3	9411.0	14/11/2014	Inventariado y Muestreado*
20	Fuente Termal	T-20	Calera	7.6	68.5	7.7	10350.0	10/11/2014	Inventariado y Muestreado*
21	Fuente Termal	T-21	Calera	7.6	68.5	7.7	10350.0	10/11/2014	Inventariado y Muestreado
22	Fuente Termal	T-22	Refugio	1	43.1	6.9	2545.0	10/11/2014	Inventariado y Muestreado
23	Fumarola	F-01	Geisser Pinchollo	1.0	83.0	6.0	2069.0	09/11/2014	Inventariado y Muestreado*
24	Fuente Termal	T-23	Puyepuye 2	5.0	81.4	2.1	1987.0	15/11/2014	Inventariado y Muestreado*
25	Fuente Termal	T-24	Puyepuye 3	5.0	84.0	6.4	441.0	15/11/2014	Inventariado y Muestreado*
26	Fuente Termal	T-25	Chihui		88.0	2.0	2971.0	15/11/2014	Inventariado y Muestreado*
27	Fuente Termal	T-26	Infiernillo		60.0	4.5	7157.0	15/11/2014	Inventariado
28	Fuente Termal	T-27	Puyepuye 1	5.0	80.7			15/11/2014	Inventariado
29	Fuente Termal	T-28	Shihui pampa		88.0	1.7	3852.0	15/11/2014	Inventariado
30	Fumarola	F-02	Fumarola Puyepuye		90.0			09/11/2014	Inventariado
31	Fumarola	F-03	Fumarola Puyepuye 4		90.0			09/11/2014	Inventariado
32	Fumarola	F-04	Fumarola Puyepuye 5		90.0			09/11/2014	Inventariado
33	Punto de control	P-01	Mina Madrigal	400.0	7.9	5.9	627.0	17/07/2008	Inventariado y Muestreado
34	Manantial	Fr-01	Manantial Madrigal 2	4.1	15.7	7.6	953.0	17/07/2008	Inventariado y Muestreado
35	Manantial Captado	Fr-02	Manantial Cabanaconde	10.5	18.9	7.6	330.0	17/07/2008	Inventariado y Muestreado
36	Manantial	Fr-03	Manantial Maca I	5.0	12.8	7.4	451.0	17/07/2008	Inventariado y Muestreado
37	Manantial	Fr-04	Mac-03-10-01	75.0	15.7	6.6	557.0	19/03/2010	Inventariado y Muestreado
38	Manantial Captado	Fr-05	Mac-03-10-03	3.5	16.8	6.8	620.0	19/03/2010	Inventariado *
39	Manantial	Fr-06	Mac-03-10-06	>180.00	17.2	7.1	250.6	19/03/2010	Inventariado y Muestreado
40	Manantial Captado	Fr-07	Mac-03-10-09	5.0	15.1	6.8	197.7	19/03/2010	Inventariado y Muestreado
41	Manantial Captado	Fr-08	Mac-03-10-13	5.0	18.6	6.7	447.0	20/03/2010	Inventariado y Muestreado
42	Fuente Termal	T-29	Mac-03-10-14	3.0	21.8	7.7	135.3	04/12/2011	Inventariado *
43	Fuente Termal	Fr-09	Mac-03-10-15	5.0	20.5	7.0	260.8	20/03/2010	Inventariado y Muestreado
44	Manantial	Fr-10	Mac-03-10-18	5.0	16.6	7.3	484.0	20/03/2010	Inventariado y Muestreado
45	Manantial Captado	Fr-11	Mac-03-10-22	4.8	10.2	7.6	104.0	21/03/2010	Inventariado y Muestreado
46	Fuente Termal	T-30	Mac-03-10-24	2.0	32.9	7.1	1293.0	22/03/2010	Inventariado y Muestreado*
47	Manantial	Fr-12	Manantial Pumunta 2	3.0	11.8	8.3	69.7	16/07/2008	Inventariado y Muestreado
48	Manantial	Fr-13	Manantial Huilcapa	2.2	15.1	7.9	402.0	15/07/2008	Inventariado y Muestreado
49	Manantial	Fr-14	Manantial Otahuantá	3.0	12.4	7.1	36.8	14/07/2008	Inventariado y Muestreado
50	Manantial	Fr-15	Manantial Huayhuapo	3.0	10.0	8.1	52.4	14/07/2008	Inventariado y Muestreado
51	Fuente Termal	T-31	Manantial Puye I	2.5	71.9	6.9	5730.0	15/01/2009	Inventariado y Muestreado
52	Galería Filtrante	G-01	Manantial El Molino	20.0	10.5	7.8	82.2	06/11/2009	Inventariado y Muestreado
53	Fuente Termal	T-32	MAC-03-10-25		41.0	7.0	2410.0	22/03/2010	Inventariado y Muestreado
54	Fuente Termal	T-33	MAC-03-10-26	1.5	45.5	6.8	5780.0	22/03/2010	Inventariado y Muestreado*
55	Fuente Termal	T-34	MAC-03-10-27	1.5	67.2	6.2	16820.0	22/03/2010	Inventariado y Muestreado*
56	Fuente Termal	T-35	Manantial Paclla **	18.0	89.6	7.8	3820.0	05/12/2011	Inventariado y Muestreado*
57	Fuente Termal	T-36	Fuente Termal Trapiche	1.2	53.6	7.4	2020.0	30/05/2007	Inventariado y Muestreado
58	Manantial Captado	Fr-16	Captación Choco	3.0	14.0	7.0	782.0	16/10/2008	Inventariado y Muestreado
59	Fuente Termal	T-37	Manantial Yawar	1.0	39.3	7.5	2699.0	05/12/2011	Inventariado y Muestreado*
60	Manantial	Fr-17	Manantial Aguallegua	5	11.8	8.2	209.0	16/10/2008	Inventariado y Muestreado
61	Fuente Termal	T-38	Manantial San Miguel	5.0	22.5	5.0	2090.0	17/10/2008	Inventariado y Muestreado
62	Manantial	Fr-18	Manantial Manco Capac	80.0	17.0	6.5	1328.0	17/10/2008	Inventariado y Muestreado*
63	Manantial Captado	Fr-19	Captación Huambo	80.0	12.0	7.8	437.0	17/10/2008	Inventariado y Muestreado
64	Manantial	Fr-20	Umajala	40.0	9.3	8.1	61.8	05/11/2009	Inventariado y Muestreado*
65	Fuente Termal	T-39	Cabana 1 **	1.5	89.7	7.4	5626.0	15/11/2014	Inventariado y Muestreado
66	Fumarola	F-05	Cabana 2 **	2.0	90.6	7.7	5775.0	15/11/2014	Inventariado y Muestreado*
67	Fuente Termal	T-40	Cabana 5 **	5.0	83.4	6.6	6063.0	15/11/2014	Inventariado y Muestreado*

\* Muestras tomadas para análisis isotópico de 2H & 18O \*\* Fuentes que pertenecen al mismo lugar tomadas en fechas distintas.



### 3.2.1 Determinación in Situ de la Temperatura obtenido en campo.

Con los datos obtenidos en campo de las temperatura superficiales de las manifestaciones inventariadas se obtuvo el mapa de iso-valores de temperatura superficial (ver figura 3.3), donde los valores más altos de temperatura se concentran principalmente en las laderas del volcán Hualca Hualca con temperaturas hasta de 90°C y a lo largo de la Valle del río Colca donde las temperaturas varían entre los 20 y 70 °C. También destaca que los valores más altos posiblemente se deba que las fuentes estén ubicadas cerca del sistema volcánico Ampato-Sabancaya - Hualca Hualca.

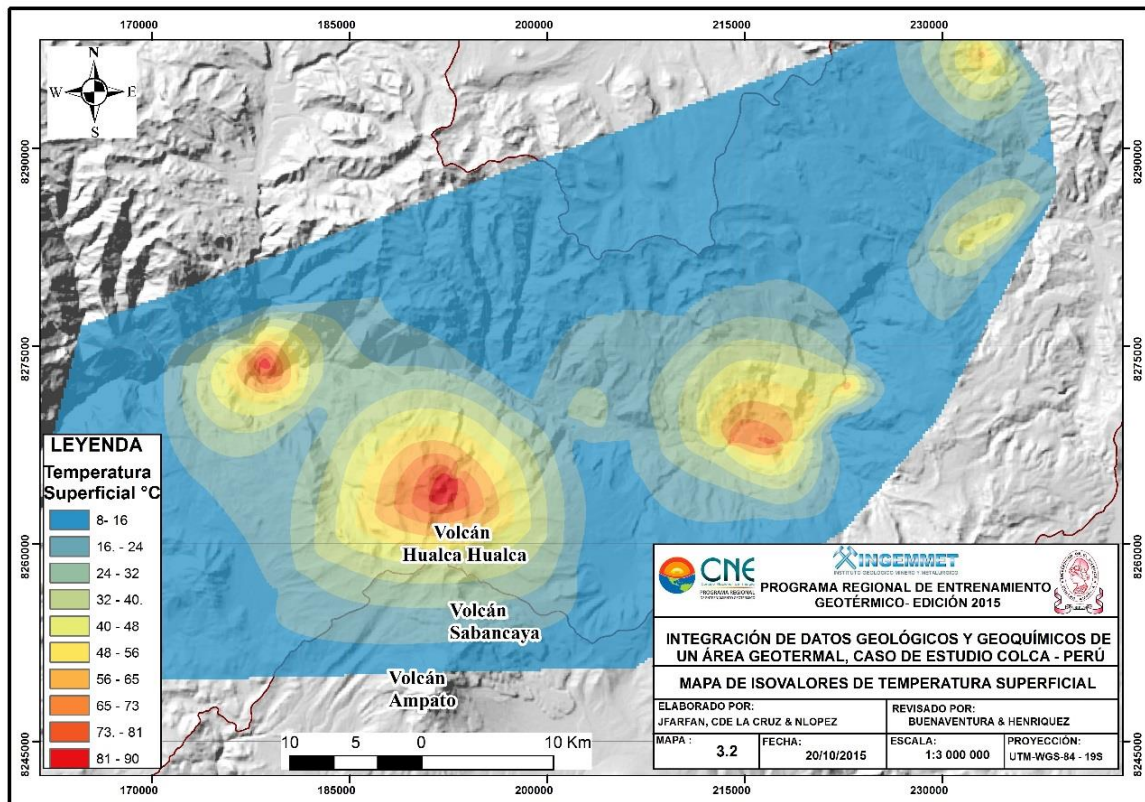


Figura N° 3.3 Mapa de Isovalores de Temperatura superficial.

### 3.3 PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Son factores físicos o parámetros que definen las características hidráulicas de los materiales que conforman las diferentes formaciones geológicas, por lo tanto permiten caracterizar hidrogeológicamente a los diferentes materiales de acuerdo a su capacidad de almacenamiento y circulación. Para el presente estudio será importante entender el comportamiento hidrogeológico de los materiales sobre todo para identificar el reservorio geotérmico y la paca sello que lo conforma.

De acuerdo a (Custodio & Llamas, 2001), estos parámetros son concretamente, la porosidad, la permeabilidad, el coeficiente de almacenamiento y la transmisividad. En el presente estudio se desarrollara de manera general los parámetros de porosidad y permeabilidad debido a que se cuenta con información obtenida de estudios hidrogeológicos anteriores e información bibliográfica, por ende estos parámetros servirá para realizar una clasificación hidrogeológica preliminar en un contexto regional.

### 3.3.1 Porosidad

La porosidad es la propiedad de un material de almacenar agua, el mismo que se define como “fracción de espacios vacíos que contiene un material sólido respecto al volumen total”. Sin embargo en los estudios hidrogeológicos, para conocer cómo se mueve el agua a través del acuífero, tiene más interés el término de «**porosidad eficaz**», que según la Unesco (2012) define como la relación entre el volumen de agua que puede ser drenado por gravedad de un medio poroso inicialmente saturado, y el volumen total del medio poroso. Por lo tanto la porosidad eficaz no representa más que una porción pequeña de la porosidad total; esta observación es importante puesto que las reservas útiles de un material acuífero están condicionados por la porosidad eficaz (Custodio & Llamas, 2001).

En la tabla 3.2 indica los valores más frecuentes de las porosidades (total y efectiva) de diferentes tipos de rocas, todos estos valores han sido tomados de manera orientativa, en especial en la porosidad eficaz, ya que las dispersiones pueden ser muy importantes, en función del estado de la roca, grado de fracturación, meteorización, edad, origen, lugar, etc. ver cuadro 3.2.

**Cuadro 3.2** Cuadro de Porosidades totales y eficaces de diversos materiales. Datos, tomados de Jhonson (1967); Davis (1969), Schoeller (1962); Muskat (1937); Meinzer (1923b); Ward (1967); etc. En Custodio & Llamas (2001).

Material		Porosidad Total, m (%)					Porosidad eficaz me (%)			Observaciones
		Valores normales			Valores Extraordinarios		Media	Máx.	Mín.	
Tipo	Descripción	Media	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	
Rocas masivas	Granito	0.3	4	0.2	9	0.05	<0.2	0.5	0	A
	Caliza masiva	8	15	0.5	20		<0.5	1	0	B
	Dolomía	5	10	2			<0.5	1	0	B
Rocas metamórficas		0.5	5	0.2			<0.5	2	0	A
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobos	30	50	10	60	5	<5	20	0	C, E
	Escorias	25	80	10			20	50	1	C, E
	Pumitas	85	90	50			<5	20	0	D
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0.1			<1	2	0.1	A
	Basaltos vacuolares	12	30	5			5	10	1	C
Rocas sedimentarias consolidadas	Pizarras	5	15	2	30	0.5	<2	5	0	E
	Areniscas	15	25	3	30	0.5	10	20	0	F
	Creta blanda	20	50	10			2	5	0.2	B
	Calizas detríticas	10	30	1.5			3	20	0.5	
Rocas sedimentarias Suelts	Aluviones	25	40	20	45	15	15	35	5	E
	Dunas	35	40	30			20	30	10	
	Gravas	30	40	25	40	20	25	35	15	
	Loess	45	55	40			<5	10	0.1	E
	Arenas	35	45	20			25	35	10	
	Depósitos glaciares	25	35	15			15	30	5	
	Limos	40	50	35			10	20	2	E
	Arcillas sin compactar	45	60	40	85	30	2	10	0	E
Suelos superiores	50	60	30			10	20	1	E	

Observaciones: A= Aumenta **m** y **me** por meteorización; B= Aumenta **m** y **me** por procesos de disolución; C= Disminuye **m** y **me** con la edad, D= Disminuye **m** y puede aumentar **me** con la edad; E= **me** muy variable circunstancias y tiempo; F= variable según el grado de cementación y su solubilidad

### 3.3.2 Permeabilidad o Conductividad Hidráulica

La permeabilidad es la capacidad de la roca o del terreno para transmitir agua. Ésta determina la relación entre la velocidad y el gradiente hidráulico, que da origen al flujo de agua a través de la roca o del medio sólido (Mook & Vries, 2002).

Los factores que determinan la permeabilidad pueden ser intrínsecos y extrínsecos. Los intrínsecos son los propios del acuífero y dependen del tamaño de los poros y los factores extrínsecos son los que dependen del fluido (agua) y son fundamentalmente su viscosidad y su peso específico.

El coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica se define como el caudal que pasa por una sección unidad del acuífero bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada (Custodio & Llamas 2001).

Los cuadros 3.3 y 3.4 representan valores de la permeabilidad en función de la conductividad hidráulica para los diferentes tipos de rocas y materiales cuaternarios tomados de distintos autores.

**Cuadro 3.3**

Tabla convencional de permeabilidad expresada en magnitud de la  $k$  a  $10^{\circ}\text{C}$ , bajo un gradiente de 1 m por metro, según Benítez (1963).

VALORES (m/día)	PERMEABILIDAD									
	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^4$
Calificación	Impermeable		Poco permeable		Algo permeable		Permeable		Muy permeable	
Calificación Hidrogeológica	Acuicludo		Acuitardo		Acuífero pobre		Acuífero medio a bueno		Acuífero	
Tipo de Materiales	Arcilla compacta granito		Limo arenoso limo Arcilla limosa		Arena fina arena limosa caliza Fracturado		Arena limpia grava y arena fina		grava limpia	

**Cuadro 3.4**

Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros /día), según varios autores.

Materiales		Doménico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 <sup>5</sup>	100 a 10 <sup>6</sup>	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1 a 50				
	Arena fina	0,02 a 20			0,01 a 1	0,01 a 1
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10 <sup>-4</sup> a 2	10 <sup>-4</sup> a 1	10 <sup>-4</sup> a 1	0,001 a 0,1	10 <sup>-4</sup> a 1
	Arcilla	10 <sup>-6</sup> a 4*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-3</sup>		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>
Arcilla marina inalterada	10 <sup>-7</sup> a 2*10 <sup>-4</sup>		10 <sup>-11</sup> a 10 <sup>-7</sup>			
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 <sup>7</sup>
	Calizas, dolomías	10 <sup>-4</sup> a 0,5	0,001 a 0,5	10 <sup>-4</sup> a 1		10 <sup>-4</sup> a 1
	Areniscas	3*10 <sup>-5</sup> a 0,5	10 <sup>-5</sup> a 1	10 <sup>-5</sup> a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 <sup>-6</sup> a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 <sup>-8</sup> a 2*10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-8</sup> a 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>		10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-8</sup>
Pizarras sed.(Shale) fracturadas/alteradas		10 <sup>-4</sup> a 1				
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>			10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-3</sup>
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 <sup>6</sup>
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 s 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>		10 <sup>-9</sup> a 10 <sup>-5</sup>
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 <sup>-5</sup> a 1	0,0005 a 20		10 <sup>-5</sup> a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
Gabro alterado	0,05 a 0,3					

### **3.4 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LAS FORMACIONES GEOLÓGICAS**

#### **3.4.1 Caracterización Hidrogeológica**

La caracterización hidrogeológica en el área de estudio, se realizó sobre la base de la cartografía geológica basado en la litología, la geomorfología como medio de circulación preferencial, las estructuras geológicas como conductos naturales de circulación, las surgencias de aguas subterráneas, las condiciones de descarga y propiedades hidráulicas de los materiales como la permeabilidad-conductividad hidráulica (K) y la porosidad (n). Estos parámetros permitieron elaborar el mapa hidrogeológico zonificando las rocas y suelos con características de almacenar y transmitir aguas subterráneas en zonas sub-superficiales, poco profundos y profundos (reservorio geotérmico), además de rocas y suelos con características poco permeables e impermeables (capa sello de reservorio geotérmico), que en muchos caso condicionan la surgencia del agua subterránea a superficie o como confinantes de los niveles permeables en profundidad. Ver cuadro 3.5.

#### **3.4.2 Mapa hidrogeológico de Colca**

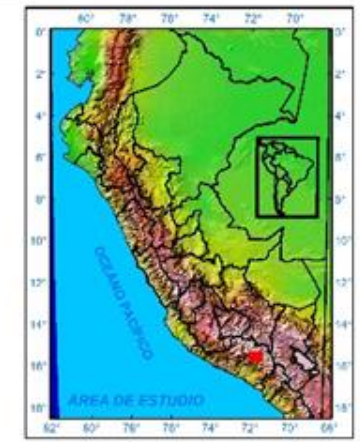
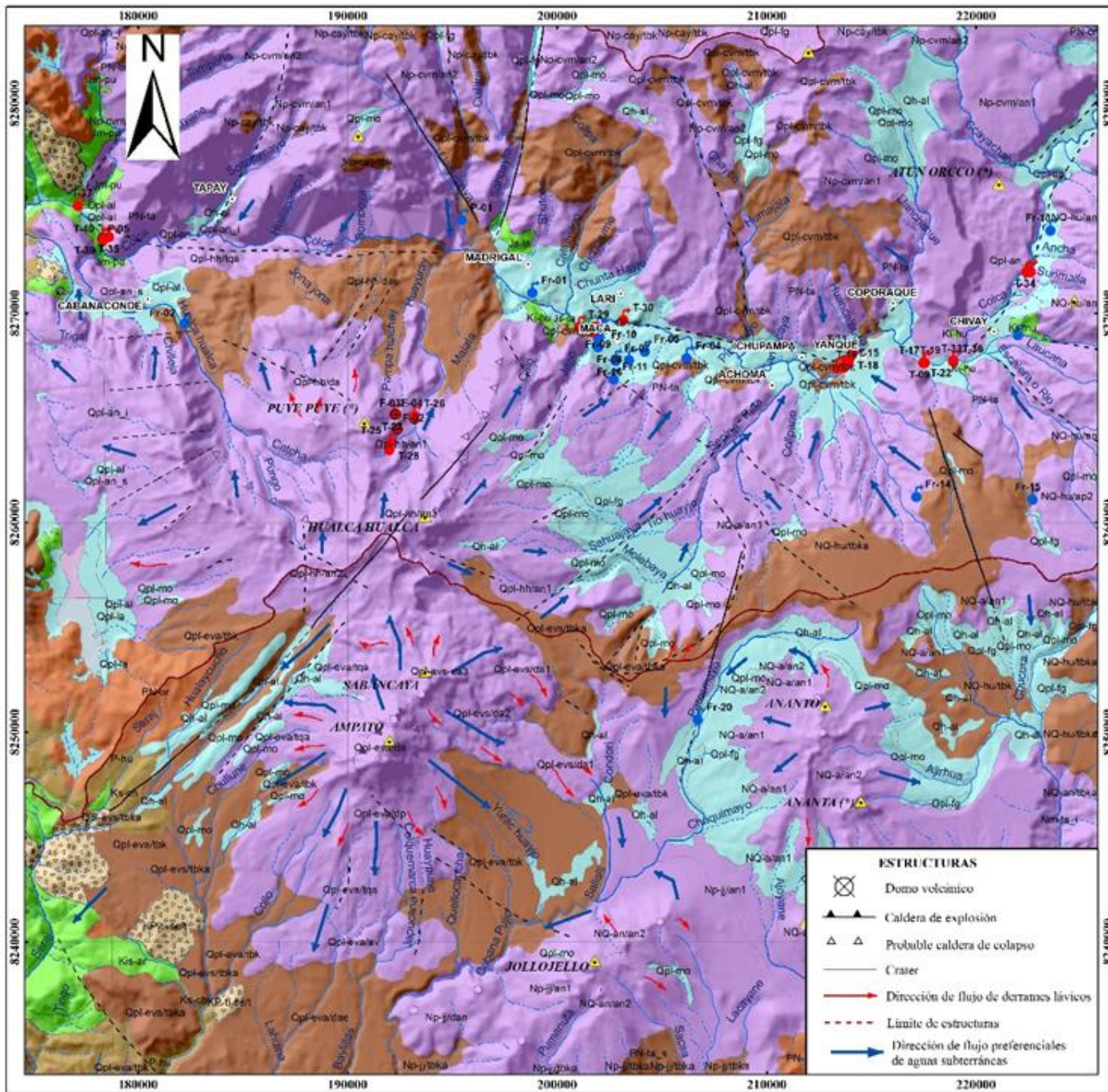
El mapa hidrogeológico del área de estudio se presenta a escala 1:180 000 y representa una cartografía hidrogeológica regional preliminar. Se desarrolló para representar cartográficamente las características hidrogeológicas de las rocas, en particular, aquellas con potencial para su prospección y exploración como reservorios geotérmico (acuíferos profundos). Este mapa representa un aporte en el desarrollo de estudios geotérmicos como instrumento que ayude en la elaboración de modelos conceptuales geotérmicos, ver MAP 3.2-2015 Mapa Hidrogeológico del Colca.

Para la representación de mapas con colores y símbolos se tomó como guía las recomendaciones establecidas en el manual para la elaboración de mapas hidrogeológicos de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), escrita por Struckmeier y Margat (1995) y que lo usan la gran mayoría de servicios geológicos del mundo.

*“Integración de datos geológicos y geoquímicos de un área geotermal, caso de estudio Colca-Perú”*

**Cuadro 3.5** Caracterización hidrogeológica en el Área geotermal del Colca

N°	Formación Geológica	Descripción Litológica	Control Estructural	Conductividad Hidráulica (m/día)	Porosidad (%)	Clasificación Hidrogeológica	
31	Depósitos Aluviales Holocenos	Presenta capas de Grava arena, limo con cierta clasificación y elementos redondeados, asociados en capas de arena, limo.	Material Acumulado	Arena = 1.7x10 <sup>-2</sup> a 16.7 Limo = 8.4x10 <sup>-5</sup> a 1.6 Grava= 25 a 2500	Arena = 20 - 40 Limo arena = 10 a 28 Limo = 34 a 50	Acuífero poroso no consolidado	
30	Depósitos Aluviales Pleistocenos	Constituida por guijarros incluidos en matriz areno-limosa, clastos subangulosos a subredondeados semiconsolidados.	Material Acumulado	Gravas = 25 a 2500 arenas = 1.7x10 <sup>-2</sup> a 16.7 Limos = 8.4x10 <sup>-5</sup> a 1.6	Gravas = 25 a 40 arenas = 20 - 40 Limos = 34 a 50	Acuífero poroso no consolidado	
29	Depósitos Fluvioglaciares	Están constituidos por gravas, arenas, limos algo consolidados angulosos	Material Acumulado	Gravas = 25 a 2500 arenas = 1.7x10 <sup>-2</sup> a 16.7 Limos = 8.4x10 <sup>-5</sup> a 1.6	Gravas = 25 a 40 arenas = 20 - 35 Limos = 34 a 50	Acuífero poroso no consolidado	
28	Depósitos Morrenicos	Constituidos por bloques, gravas, arenas heterogeneas(angulosos a subangulosos) y limo en matriz areno-limosa arcillosa pobremente clasificados a veces con leve pseudo-estratificación.	Material Acumulado	Gravas = 25 a 2500 arenas = 1.7x10 <sup>-2</sup> a 16.7 Limos = 8.4x10 <sup>-5</sup> a 1.6	Gravas = 25 a 40 arenas = 20 - 35 Limos = 34 a 50	Acuífero poroso no consolidado	
27	Estratovolcán Sabancaya	Flujos dacíticos con textura fluidad	presencia de fracturas favorables para la infiltración	Lavas = 8x10 <sup>-3</sup> a 8x10 <sup>-5</sup>	Lavas = 0.3 a 5	Acuífero Fisurado Volcánico	
26		Tobas Soldadas Vitrificadas	Materiales Poco permeables	Toba de cristales = 0.17216*10 <sup>-7</sup>	Toba de cristales= 3 a 5	Acuitardo Volcánico	
25	Estratovolcán Ampato	tobas de cristales no soldadas	Materiales Poco permeables	Toba de cristales = 0.17216*10 <sup>-2</sup>	Toba de cristales= 5 a 17	Acuitardo Volcánico	
24		Flujos dacíticos porfíricas	presencia de fracturas favorables para la infiltración	Lavas = 8x10 <sup>-3</sup> a 8x10 <sup>-5</sup>	Lavas = 0.3 a 5	Acuífero Fisurado Volcánico	
23		Depositos de Avalancha de escombros	Materiales con matriz arcillosa	No determinado	No determinado	Acuitardo Volcánico	
22		Flujos traquiandesitas	presencia de fracturas favorables para la infiltración	Lavas = 8x10 <sup>-3</sup> a 8x10 <sup>-5</sup>	Lavas = 0.3 a 5	Acuífero Fisurado Volcánico	
21		Flujos de Lavas Andesíticas vesiculadas porfíricas				Acuífero Fisurado Volcánico	
20		Tobas Soldadas Vitrificadas	Materiales Poco permeables	Toba de cristales = 0.17216*10 <sup>-7</sup>	Toba de cristales= 3 a 4	Acuitardo Volcánico	
19		Complejo Volcánico Hualca Hualca	Depositos de Avalancha de escombros	Materiales con matriz arcillosa	No determinado	No determinado	Acuitardo Volcánico
18			Flujos de Lavas dacíticos porfírica	presencia de fracturas favorables para la infiltración	Lavas Andesíticas = 8x10 <sup>-3</sup> a 8x10 <sup>-5</sup> Toba de cristales = 0.17216*10 <sup>-7</sup>	Lavas Andesíticas = 0.3 a 5 Toba de cristales= 5 a 17	Acuífero Fisurado Volcánico
17	Flujos de Lavas andesíticas porfírica						
16	Flujos de Lavas andesíticas intercaladas con tobas de cristales.						
15	Flujos traquiandesíticos						
14	Caldera Cailloma	Tobas de cristales, formaciones muy limitadas	Materiales poco permeables	Toba de cristales = 0.17216*10 <sup>-5</sup>	Toba de cristales= 5 a 16	Acuitardo Volcánico	
13	Estrato Volcán Minas	Flujos de Lavas andesíticas formaciones muy limitadas	presencia de fracturas favorables para la infiltración	Lavas Andesíticas = 8x10 <sup>-3</sup> a 8x10 <sup>-5</sup>	Lavas Andesíticas = 0.3 a 5	Acuífero Fisurado Volcánico	
12	Complejo Volcánico Mismo	Compuesto por secuencias de flujos andesíticos y tobas de cristales, mayor % de lavas.	Se encuentran fracturadas y diaclasas.	Lava Andesita = 8x10 <sup>-3</sup> a 8x10 <sup>-5</sup> Toba = 0.17216*10 <sup>-5</sup>	Lava Andesita = 1 a 5 Toba = 5 a 17	Acuífero Fisurado Volcánico	
11	Grupo Tacaza	Formación Tacaza Superior	Lavas andesíticas estratificados e intercalados con tobas y brechas, con mayor predminio de lavas.	Se encuentran fracturadas y diaclasadas.	Lava Andesita = 8x10 <sup>-3</sup> a 8x10 <sup>-5</sup>	Lava Andesita = 1 a 5 Brecha volcánica = Baja	Acuífero Fisurado Volcánico
10		Formación Orcopampa	Niveles tobáceos amarillentos y brechas volcánicas, asociadas a sedimentos lacustres	Forman homoclinal N-S inclinado hacia el Oeste	Toba = 0.17216*10 <sup>-5</sup>	Tobas 5 a 17	Acuitardo volcánico sedimentario
9		Formación Tacaza Indiviso	Lavas andesíticas intercaladas con tobas, con mayor predominio de lavas.	fracturas superficiales muy limitado.	Lavas Andesíticas= 0.1742 Toba de = 0.17216*10 <sup>-7</sup>	Lavas Andesíticas= 1 a 5 Tobas 5 a 16	Acuífero Fisurado Volcánico
8	Formación Huanca	Conglomerados polimícticos predominantemente con clastos de rocas volcánicas y en menor proporción de restos de areniscas y calizas	Se encuentran fracturadas y diaclasadas no interconectadas	Caliza = 6x10 <sup>-4</sup> a 1 Conglomerados=2x10 <sup>-6</sup>	Calizas = 0.5 a 17 Conglomerados= Baja	Acuitardo Sedimentario	
7	Formación Arcurquina	Calizas gris claras con lentes y concreciones de chert. Margas y fangolitas, en mayor porcentaje predominan las calizas fracturadas.		Calizas = 6x10 <sup>-4</sup> a 1 Margas = 6x10 <sup>-3</sup> a 10	Calizas = 0.5 a 17	Acuífero Fisurado Sedimentario	
6	Formación Murco	Lutitas abigarradas rojo voláceas y verdes con niveles de areniscas cuarzosas de grano medio. Presentan horizontes permeables.		Areniscas = 4.8x10 <sup>-2</sup> a 3 Lutitas = 4x10 <sup>-3</sup> a 2x10 <sup>-3</sup>	Areniscas = 10 a 26 Lutitas oscuras = 15 a 21	Acuitardo Sedimentario	
5	Grupo Yura	Formación Hualhuani	Areniscas cuarcíferas intercaladas con lutitas. En mayor porcentaje predominan las areniscas	Muy fracturada y plegada, presentan fallas, anticlinales y sinclinales.	Areniscas cuarzosas = 4.8x10 <sup>-2</sup> a 3 Lutitas = 4x10 <sup>-3</sup> a 2x10 <sup>-2</sup>	Areniscas cuarzosas = 10 a 26 Lutitas = 15 a 20	Acuífero Fisurado Sedimentario
4		Formación Gramadal	Calizas lajosas y oscuras intercaladas con lutitas		Calizas = 6x10 <sup>-4</sup> a 1 Lutitas = 4x10 <sup>-6</sup>	Calizas = 0.5 a 17 Lutitas = 25	Acuitardo Sedimentario
3		Formación Labra	Areniscas, en la parte superior intercaladas con paquetes de limolitas, en los niveles inferiores lutitas carbonosas con restos de flora.		Areniscas = 4.8x10 <sup>-2</sup> a 3 Limolitas = 8x10 <sup>-6</sup> a 1.7x10 <sup>-3</sup> Lutitas = 4x10 <sup>-3</sup> a 2x10 <sup>-3</sup>	Areniscas = 10 a 26 limolitas = 5 a 10 Lutitas oscuras = 15 a 21	Acuífero Fisurado Sedimentario
		Formación Cachios	Lutitas de color negro con abundantes intercaladas con areniscas calcareas		Areniscas = 4.8x10 <sup>-2</sup> a 3 Lutitas = 4x10 <sup>-3</sup> a 2x10 <sup>-4</sup>	Areniscas = 10 a 26 Lutitas oscuras = 15 a 22	Acuitardo Sedimentario
2		Formación Puente	Secuencia de areniscas y areniscas cuarzosas e intercaladas con lutita y limoarcillitas de color gris oscuro.		Areniscas cuarzosas = 4.8x10 <sup>-2</sup> a 3 Limolitas = 8x10 <sup>-6</sup> a 1.7x10 <sup>-3</sup> Lutitas = 4x10 <sup>-3</sup> a 2x10 <sup>-2</sup>	Areniscas cuarzosas = 10 a 26 limolitas = 5 a 10	Acuífero Fisurado Sedimentario
1	Súper Tiabaya	Tonalita-Diorita y Adamelita	presencia de fracturamiento no interconectado	Intrusivos= 0.1416 a 0.1767	Tonalita-Diorita 0.1 a 0.6	Acuitardo intrusivo	



**LEYENDA**

- Inventario de Fuentes**
- Fumarola
  - Fuentes Frías <20°C
  - Fuentes Termale >20°C
  - Capital de distrito
  - Volcáncs
- Clasificación Hidrogeológica**
- Acuífero Poroso No Consolidado
  - Acuífero Fisurado Sedimentario
  - Acuífero Fisurado Volcánico
  - Acuitardo Sedimentario
  - Acuitardo Volcánico Sedimentario
  - Acuitardo Volcánico
  - Acuitardo Intrusivo
- Drenaje\_colca**
- Ríos
  - Quebrada
  - Quebrada Intermitente
  - Limite de Cuenca
  - Laguna
- FALLAS**
- Falla Normal
  - Falla Infrida
  - Falla Inversa
  - Falla regional

- ESTRUCTURAS**
- Domo volcánico
  - Caldera de explosión
  - Probable caldera de colapso
  - Cráter
  - Dirección de flujo de derrames lávicos
  - Limite de estructuras
  - Dirección de flujo preferenciales de aguas subterráneas

**PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO GEOTÉRMICO - EDICIÓN 2015**  
**INTEGRACIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS Y GEOQUÍMICOS DE UN ÁREA GEOTÉRMICA, CASO DE ESTUDIO COLCA-PERÚ**  
**MAPA GEOLÓGICO Y GEOTÉRMICO**

LABORATORIO N.º:	LABOR. COLCACRIS Y NLOPEZ	REVISADO POR:	ELIZAVETHA Y LINDRQUEZ
MAPA:	ETIQUETA	ESCALA:	PROYECCIÓN:
MAJ: 3.2.15	2010.2015	1:80.000	WGS84 219.5

### **3.4.3 Unidades hidrogeológicas**

La distribución espacial de las unidades hidrogeológicas en el área de estudio, muestra principalmente en mayor extensión espacial como materiales permeables a los acuíferos fisurados volcánicos característico en zonas de dominio volcánico, en menor porcentaje acuíferos porosos no consolidados y finalmente acuíferos fisurados sedimentarios cuyo afloramiento se ubican en la parte baja del valle del río Colca. Los acuitardos también representan una importante disposición espacial pero con mayor predominio de los acuitardos volcánicos seguidos de los intrusivos, ver mapa hidrogeológico. La importancia de describir a las unidades hidrogeológicas en el presente estudio es para identificar a los materiales que guardan relación con el reservorio geotérmico y su capa confinante (capa sello).

#### **Acuíferos**

Es toda formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua subterránea. Es decir, aquella que permite el movimiento del agua por diferencias de presión. La actividad tectónica juega un papel muy importante en la formación de los acuíferos, sobre todo en los acuíferos fisurados pues a través de estos procesos se forman los sistemas de fallas y fracturas que afectan a las rocas generando zonas permeables que favorecen la circulación de agua subterránea o de los fluidos geotérmicos en profundidad.

En el presente estudio se atribuye a la identificación de zonas o estratos permeables profundos que puedan albergar fluidos geotérmicos. Según su litología, extensión y productividad, los acuíferos se han clasificado en tres grupos (Mapa hidrogeológico).

- Acuíferos porosos no consolidados
- Acuíferos fisurados o fracturados volcánicos
- Acuíferos fisurados o fracturados sedimentarios

#### Acuíferos porosos no consolidados

Corresponde a los materiales que se encuentran rellenando los valles y dispuestos en laderas, son depósitos en forma de terrazas y de características detríticas no consolidados. Son formaciones, porosas y permeables, compuestas en su gran mayoría por depósitos recientes y clastos de diferente tamaño. Su componente litológico corresponde a depósitos aluviales, morrénicos y fluvioglaciares con acumulaciones de gravas (redondeada a sub redondeadas y angulosas a sub angulosas), arenas y limos, las mismas que tienen propiedades permeables, condicionadas generalmente por un substrato base con características poco permeables. De acuerdo a los espesores que presentan son los aluviales con mayor espesor que se ubican en el valle en río Colca, los materiales morrénicos y fluvioglaciares en gran parte van cubriendo a los materiales lávicos y se ubican en zonas topográficamente suaves pero de espesores limitados, por su ubicación y disposición de estos materiales representan zonas favorables para la infiltración definiendo así zonas de recarga para los acuíferos sub- superficiales y del sistema geotermal.

#### Acuíferos Fisurados o fracturados volcánicos

Las rocas volcánicas formadas a partir de materiales fundidos a gran temperatura y a distintas profundidades, desarrollan espacios vacíos (poros y fracturas) por enfriamiento y cristalización,



las mismas que le otorgan propiedades hidráulicas importantes a las rocas volcánicas, Peña et al 2015.

En la zona de estudio los centros volcánicos Minas, Mismi, Hualca Hualca, Ampato y Sabancaya, corresponden al Grupo Barroso, los tres últimos con mayor incidencia en el área geotermal de Ampato-Sabancaya-Hualca-Hualca y sus afloramientos corresponden a diferentes eventos eruptivos. El complejo volcánico Mismi (Np-cvm/an1, Np-cvm/an, Qpl-cvm/tbk) está constituido por depósitos de flujos de lava andesitas con alternancia de depósitos de flujos piroclásticos o tobas de cristales. Las características litológicas conformadas por flujos de lava pertenecen a depósitos permeables formando acuíferos de baja productividad y los niveles de piroclásticos mas la presencia de alteración forma niveles poco permeables.

Los eventos eruptivos de los complejos Hualca Hualca, Ampato y Sabancaya de extensión local muestran similar materiales eruptivos, están formados por alternancia de flujos de lava andesítico, andesítico porfirítico, dacítico y traquiandesítico, que otorgan propiedades permeables a través de fracturas verticales. Asimismo estos materiales facilitan la infiltración de aguas superficiales hacia las zonas más profundas. En conjunto el Grupo Barroso tienen un espesor promedio de 1200 m y a sus materiales permeables se le clasifica como acuífero fisurado volcánico pero de baja productividad.

Otra de las unidades importantes desde el punto de vista geotérmico es el Grupo Tacaza, debido a que posiblemente albergue al reservorio geotérmico de mayor interés en la base del grupo. Se encuentra conformado por tres formaciones con distinta característica hidrogeológicas. La Formación Tacaza Superior tiene a la base depósitos de flujos de lava andesítico, cubiertos por intercalaciones de brechas y tobas de bloques, de apariencia impermeable; sin embargo, el componente de fracturas y su disposición de paleorelieves le otorgan propiedades permeables. La Formación Orcopampa constituido por niveles de tobas de bloques amarillentos y brechas volcánicas, intercalados con areniscas medias a finas y limolitas amarillentas con posibles zonas de alteración, por sus características impermeable se ha caracterizado como acuitardos volcánicos sedimentarios y posible capa sello del reservorio geotérmico. Por último se tiene a la Formación Tacaza Inferior (Indiviso) como posible acuífero que alberga al reservorio geotérmico; esta Formación está compuesta principalmente por lavas andesíticas a traquibasálticas e intercaladas con tobas. Cabe señalar que esta unidad se infiere en la zona de Hualchahualca y Ampato, debido a que en muchos sectores del área de estudio se mantienen la secuencia basal del Grupo Tacaza.

En general las rocas volcánicas en el área de estudio, procedentes de diferentes centros volcánicos, están formados a partir de eventos volcánicos eruptivos muy variados, los mismos que evidencian fracturamiento y afectación de fallas, permitiendo la circulación del agua subterránea, la infiltración y percolación hacia niveles más profundos.

#### Acuíferos fisurados o fracturados sedimentarios

Corresponden a secuencias sedimentarias Jurásicas-Cretácicas del Grupo Yura y la Formación Arcurquina, en gran parte estas rocas se encuentran plegadas y muy fracturadas, es decir poseen porosidad secundaria importante, lo cual hace posibles formar importantes acuíferos en la región del sur del Perú.

El Grupo Yura denominado también acuífero multicapa pose secuencias permeable de areniscas cuarcitas intercaladas con paquetes de calizas confinados con materiales

impermeables como las lutitas y limoitas o calizas lutáceas. Los niveles permeables los conforman la Formación Puente, Labra y Hualhuani. Es posible que el Grupo Yura en relación a la zona geotermal se localice en la zona distal del reservorio geotérmico y que podrían albergar fluidos geotérmicos evidencia de ello son las fuentes termales en el sector de Pacla y la fumarola respectivamente.

### **Acuitardos:**

Es toda formación geológica capaz de almacenar aguas subterráneas en su interior pero por su escasa permeabilidad se transmite muy lentamente o en ocasiones por condiciones de alteración de los materiales llegan a ser impermeables. El análisis hidrogeológico de los niveles impermeables ayuda a identificar a los materiales impermeables como a posible capa sello del sistema geotermal. De acuerdo al mapa hidrogeológico se distingue las siguientes formaciones, también se pueden observar que estas unidades hidrogeológicas también son afectadas por diferentes sistemas de fallas por lo tanto el flujo de aguas subterránea es limitado por estas fallas lo cual permiten la percolación a los niveles permeables o permiten la surgencia de los flujos a superficie ver sección Hidrogeológica.

- Acuitardos en rocas sedimentarias
- Acuitardo en rocas volcánicas
- Acuitardos en rocas intrusivas

### **Acuitardos en rocas sedimentarias**

Parte de las formaciones del Grupo Yura que aflora en el valle del río Colca, presentan materiales poco permeables e impermeables como es el caso de la formación Cachios y Gramadal, constituidas por Lutitas de color negro con abundantes intercaladas con areniscas calcáreas y calizas oscuras, estos materiales alternan los acuíferos presentes del Grupo Yura. La Formación Murco que también de contenido fino en su mayoría (lutitas abigarradas), alberga esporádicas franjas de areniscas fracturadas y permeables pero de espesores delgados, por lo cual no alcanza a formar zonas de almacenamiento de aguas subterráneas. Sin embargo se observan pequeñas surgencias entre sus fracturas (foto 2.11), lo cual no es suficiente para ser calificado como acuífero calificándose como acuitardo sedimentario con señales de interés hidrogeológico puntual.

La secuencia constituida por materiales masivos de Conglomerados polimícticos predominantemente con clastos de rocas volcánicas y en menor proporción de restos de areniscas y calizas corresponden a la Formación Huambo, por su aspecto masivo y de poca continuidad de sus fracturas se ha caracterizado como acuitardos sedimentarios, poco permeables.

### **Acuitardo en rocas volcánicas**

Los acuitardos volcánicos se encuentran conformando los niveles poco permeables a impermeables de los centros volcánicos Ampato, Sabancaya y Hualcahualca y Andahua, principalmente constituidos por tobas y avalancha de escombros.

La Formación Orcopampa del Grupo Tacaza presenta materiales impermeables en su composición litológica, por lo cual se ha considerado como posible capa sello del reservorio geotérmico.

## CAPITULO IV GEOQUÍMICA

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los resultados obtenidos del procesamiento e interpretación de datos geoquímicos disponibles para la zona de estudio, proveniente de diversas jornadas de reconocimiento de manifestaciones frías y calientes, dicho conjunto de datos se presenta condensado en el cuadro 4.1 a continuación:

**Cuadro N° 0.1:** Data Geoquímica disponible para la zona de estudio

Código	Nombre	Cota	Fecha	Caudal(Q)	Temp. Fuente	pH	HCO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	As	B	Ca	K	Mg	Na	SiO <sub>2</sub>	2H	18O
T-07	Puye 1	3340	10/11/2014	4.5	75.5	6.87	800	920.995	265.79	0.009	7.83	68.463	45.3	6.926	833.42	76.93	123.2	15.91
T-08	Mullahuata	3896	14/11/2014	0.7	59.8	6.39	838.3	8879.795	292.51	1.071	23.26	505.459	265.9	64.649	5848.68	48.52	-	-
T-11	Sabancaya	3347	10/11/2014	1.5	74	7.63	844.1	1253.035	361.52	0.009	10.06	69.062	52.8	7.891	1053.28	4.16	-	-
T-12	Chancadora	3794	13/11/2014	-	38.4	6.74	1038.3	891.826	458.3	0.652	16.73	58.622	28.8	20.616	1155.99	95.6	126.8	16.14
T-13	Baños del Inca	3819	11/11/2014	1	44.5	6.7	1294.4	1350.44	546.84	0.5	19.19	62.62	26.9	12.801	1622.52	75.59	-138	17.88
T-14	Ipo 2	3798	11/11/2014	1.9	50.3	7	1230.7	652.72	361.69	0.716	14.49	28.176	18.5	8.661	1067.06	69.32	128.3	16.36
T-15	Mismi	3325	10/11/2014	0.1	65.5	7.23	809.3	836.44	215.93	0.005	10.32	65.22	53.9	9.527	1067.81	96.98	-127	16.04
T-16	Baños Chacapi	3356	10/11/2014	1	39.7	7.33	388.3	99.529	250.55	0.044	1.11	30.447	11.1	2.383	242.36	142.01	118.2	15.56
T-17	Huallhualca 1	3426	14/11/2014	1.2	54.3	7.43	580.7	767.854	330.85	0.026	7.2	102.097	43.4	11.469	693.87	88.16	125.1	16.59
T-18	Puye 2	3333	10/11/2014	1.2	78	7.12	841	1124.12	311.27	0.01	10.64	71.531	56.5	8.261	1080.86	90	123.7	15.94
T-19	Huallhualca 3	3417	14/11/2014	3	77.1	7.25	798.4	1422.16	545.42	0.082	10.78	88.052	55.5	11.146	1212.13	101.49	-	-
T-20	Calera	3637	10/11/2014	7.6	68.5	7.71	835.3	1705.25	313.97	0.775	15.73	104.491	55.9	12.964	1333.42	66.51	-135	17.31
T-21	Calera	3637	10/11/2014	7.6	68.5	7.71	831.1	1642.49	310.06	0.783	16.39	105.991	55.6	12.959	1321.37	86.31	-	-
T-22	Refugio	3479	10/11/2014	1	43.1	6.92	439.3	119.488	155.03	0.03	2.4	65.257	18.6	15.833	248.25	63.14	-	-
F-01	Geisser Pinchollo	4370	09/11/2014	1	83	6.02	55.3	1.567	208.64	0.001	0.11	75.045	4.3	10.999	15.27	58.16	113.1	15.43
T-23	Puyepuye 2	4620	15/11/2014	5	81.4	2.07	0.6	0.888	582.9	0.001	0.01	6.627	3.9	2.7	6.52	263.06	-80.7	-4.86
T-24	Puyepuye 3	4619	15/11/2014	5	84	6.4	31.4	3.191	214.23	0.001	0.02	27.677	6.2	10.018	23.05	91.92	-93.5	10.68
T-25	Chihui	4849	15/11/2014	indf	80?	2.02	0.6	1.996	1296.6	0.004	0.01	7.898	5.2	3.813	6.51	187.82	-89.6	-9.95
P-01	Mina Madrigal	3184	17/07/2008	400	7.9	5.9	0.61	1	274	0.005	0.1	70	1.8	13.65	7.1	22.45729537	-	-
Fr-01	Manantial Madrigal 2	3218	17/07/2008	4.1	15.7	7.63	131.76	8	240	0.027	0.2	70	14.4	18.67	40.1	46.83950178	-	-
Fr-02	Manantial Cabanaconde	3399	17/07/2008	10.5	18.9	7.63	52.46	3	47	0.005	0.1	23.3	3.7	13.09	13.3	59.67224199	-	-
Fr-03	Manantial Maca I	3297	17/07/2008	5	12.8	7.41	38.43	73	22	0.005	0.5	16.5	5.7	9.5	39.6	41.06476868	-	-
Fr-04	Mac-03-10-01	3327	19/03/2010	75	15.7	6.59	177	13.6	62.7	0.004	0.080	47.2747	2.1594	18.32	28.1325	64.46227616	-	-
Fr-06	Mac-03-10-06	3319	19/03/2010	>180.00	17.2	7.1	83.3	3.7	56.7	0.0072	0.038	25.6288	1.8433	7.7101	15.3813	61.9752911	-	-
Fr-07	Mac-03-10-09	3336	19/03/2010	5	15.1	6.75	61.8	3	40.4	0.0058	0.029	15.1483	1.8812	6.8166	11.7544	58.83490569	-	-
Fr-08	Mac-03-10-13	3355	20/03/2010	5	18.6	6.73	81.5	65.7	19.9	0.0029	0.3873	20.4935	5.5038	8.8458	42.2242	49.3258452	-	-
Fr-09	Mac-03-10-15	3217	20/03/2010	5	20.5	7.01	123.6	19	10	0.0058	0.074	16.0243	2.5047	7.6248	14.9679	56.1845176	-	-
Fr-10	Mac-03-10-18	3220	20/03/2010	5	16.6	7.25	126.3	61.3	26.9	0.0065	0.1991	27.2253	7.8926	19.103	23.507	56.27434626	-	-
Fr-11	Mac-03-10-22	3641	21/03/2010	4.8	10.2	7.58	41.7	1.3	19.8	0.0004	0.018	8.9692	1.5419	3.9325	6.0252	46.71566584	-	-
T-29	Mac-03-10-24	3230	22/03/2010	2	32.9	7.12	179.1	3.8	294.51	0.0751	0.1142	83.0653	8.0312	28.9583	41.669	74.60099644	108.3	14.52
Fr-12	Manantial Pumunta 2	3842	16/07/2008	3	11.8	8.29	15.86	1	2	0.005	0.1	4.3	2.2	2.35	3.7	30.58469751	-	-
Fr-13	Manantial Huilcapa	3748	15/07/2008	2.2	15.1	7.97	87.23	2	39	0.009	0.2	43.3	1.6	12.37	8.6	12.61886121	-	-
Fr-14	Manantial Otahuanta	4495	14/07/2008	3	12.4	7.07	6.71	1	4	0.005	0.1	1.6	2.7	0.83	2.2	34.00676157	-	-
Fr-15	Manantial Huayhuapo	4572	14/07/2008	3	10	8.12	10.98	1	2	0.005	0.1	3.1	3.1	1.32	2.5	29.30142349	-	-
Fr-16	Captación Choco	2542	16/10/2008	14	14	6.95	77.47	18	253	0.005	0.2	70	2.4	18.77	17.9	9.2	-	-
Fr-17	Manantial Aquelegua	1910	16/10/2008	11.8	11.8	8.23	45.75	3	27	0.005	0.1	19	1.3	7.34	10.5	20.5	-	-
Fr-18	Manantial Manco Capac	3355	17/10/2008	17	17	6.46	286.9	39	286	0.005	0.3	70	4	29.97	32.4	15.2	110.2	15.03
Fr-19	Captación Huambo	3666	17/10/2008	12	12	7.75	76.86	33	42	0.005	0.1	54.6	2.2	5.37	21.1	11.3	-	-
Fr-20	Umajala	4519	05/11/2005	22.5	22.5	5.04	197.64	63	367	0.005	0.3	70	5.6	35.52	46.1	17.4	-	-
T-30	Manantial Puye I	3332	15/01/2009	2.5	71.9	6.94	0.61	366	144	0.005	1.4	7	7.6	0.72	>70	8.555160142	-	-
G-01	Manantial El Molino	3681	06/11/2009	20	10.5	7.75	40.9	2.8	1.6	0.002	0.0243	8.1473	1.768	1.8594	4.4857	27.83250249	-	-
T-29	MAC-03-10-25	3840	22/03/2010	41	41	6.95	335.4	99	244.16	0.052	1.5782	31.5042	13.9944	1.7182	239.7015	126.2745915	-	-
T-30	MAC-03-10-26	3334	22/03/2010	1.5	45.5	6.82	516.1	449.3	321.6	0.0454	6.1555	57.4425	34.6627	9.5333	478.4109	76.18669537	117.3	15.67
T-31	MAC-03-10-27	3664	22/03/2010	1.5	67.2	6.19	477.8	1614.4	331.9	0.7663	21.60	112.6863	69.8161	9.8389	1264.9521	56.43197509	134.7	17.72

T-32	Manantial Pacia	2883	05/12/2011	18	89.6	-	83.72	923.3	333.7	1.43	16	50.9	78.2	4	574.8	0	-103	12.81
T-33	Fuente Termal Trapiche	3464	30/05/2007	1.2	53.6	7.44	234	275	327	0.04		61.24	29.92	10.58	365	0		
T-34	Manantial Yawar	2106	05/12/2011		9.3	8.1	23.6	1	3.6	0.0025	0.023	3.691	2.1462	1.7315	4.6158	16.9571		118.6
T-35	Manantial San Miguel	3089	17/10/2008		39.3	7.47	94.45	145.1	1580	0.02		361.9	4.4	51.7	210.2			119.5

## 4.2 MUESTREO DE AGUAS.

En una primera instancia y previamente al procesamiento de los datos es de suma importancia el conocimiento de la información recolectada en campo, mediante la identificación de los tipos de muestra tomadas, el entorno geológico y geomorfológico del cual han sido extraídas así como la distribución geográfica del muestreo; en el caso de estudio se cuenta con la información de un total de 62 muestras entre las cuales se distinguen muestras tomadas en manantiales fríos, ríos, fuentes termales de mediana temperatura, fuentes termales en ebullición, fumarolas y pozos domésticos con lo cual se realiza una primera caracterización de las muestras disponibles y la información valiosa que estas podrán dar para la construcción del modelo conceptual del sistema.

## 4.3 CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS

Como primer paso del análisis, se realiza la clasificación geoquímica de las aguas muestreadas en la zona de estudio, para ello se realiza una estratificación de las muestras distinguiéndolas como termales (T) y manantiales fríos (Fr); a fin de una mejor identificación se asignan diferentes símbolos a las aguas provenientes de fuentes termales (diamante color verde), manantiales fríos (asterisco color azul), información de fuentes termales adicionales de otros estudios (diamante color morado) y la muestra de agua del río Colca (asterisco color rosa), esto se muestra en la figura 4.1, la cual presenta el diagrama de Piper para las aguas de la zona de Colca, así también la figura 4.2 muestra el diagrama ternario con los tres principales aniones para las muestras de la zona; en ambos diagramas puede observarse que en la zona existen muestras que se ubican dentro de las zona de aguas cloruradas profundas, aguas bicarbonatadas o superficiales, aguas cloruradas diluidas y aguas calentadas por vapor.

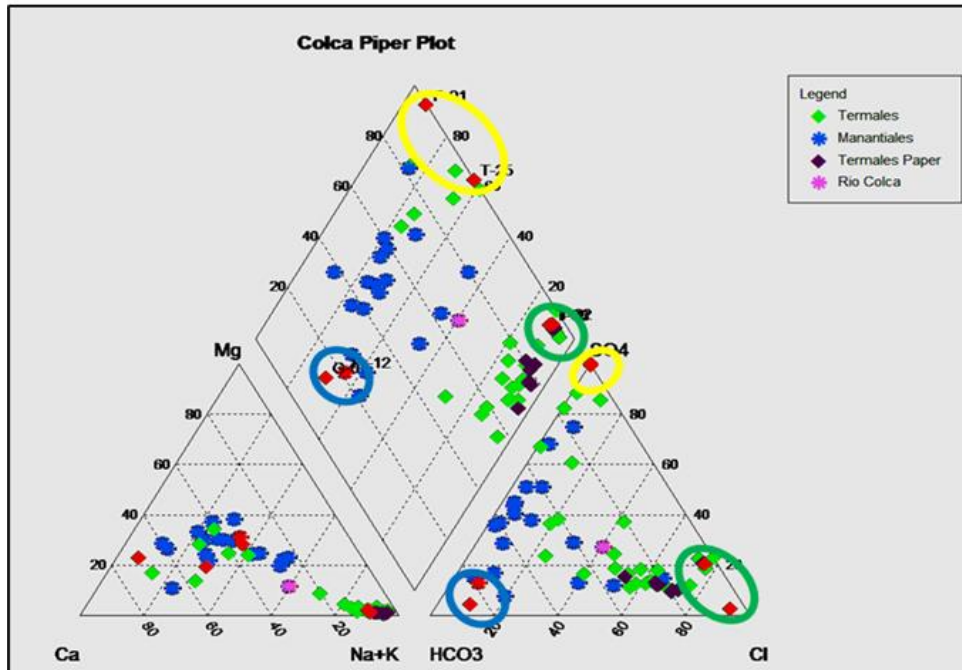


Figura 0.1 Diagrama de Piper para muestras de la zona de estudio

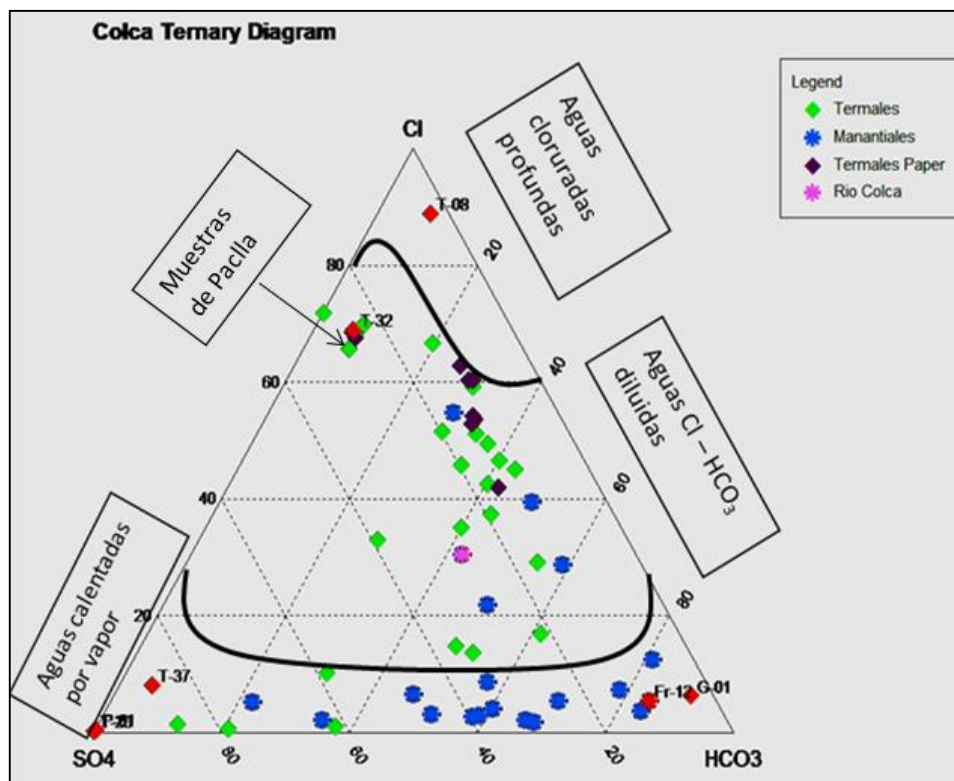


Figura 0.2 Diagrama ternario para clasificación de aguas D' amore Giggenbach

El diagrama para clasificación de aguas de Piper mostrado en la figura 4.1 y el diagrama ternario aniónico mostrado en la figura 4.2 ponen de manifiesto la existencia de muestras cuyas características de tipo cloruradas sódicas indican su proveniencia de un reservorio geotérmico profundo, en este caso se destaca la muestra T-08 de la zona de Mulhauata la cual aflora en la zona noreste aproximadamente a 50 km del complejo volcánico reciente (ver figura 4.4) y lo cual podría indicar que pertenece a un sistema distinto, la temperatura de la manifestación es de 59.8 y su contenido de cloruros es bastante elevado de aproximadamente 8,879 ppm sin embargo contiene relativamente poco boro (23 ppm) con respecto a sus cantidades de cloruros; destacan también las muestras de tipo cloruradas sódicas encabezadas por la muestra T-32 la cual aflora en la zona noroeste del complejo volcánico reciente a 20 Km del mismo (ver figura 4.4), esta zona es conocida como Pacla y Cabaconde, esta muestra encabeza un grupo de muestras con similares características como se indica en la figura 4.2, la temperatura de la manifestación es de 89.6 °C y el contenido en cloro de dicha muestra es de 923 ppm con bajo contenido de magnesio de 4 ppm, el resultado de boro para esta muestra no está disponible sin embargo las otras muestras de su misma zona presentan contenidos de 16 a 20 ppm, lo cual le confiere características de un agua proveniente de un reservorio geotérmico, por lo cual podemos decir que para el sistema en estudio se tienen muestras que reflejan la existencia de un reservorio geotérmico profundo. Los diagramas de Stiff para este tipo de muestras representativas se pueden observar en la figura 4.3 en color verde para las muestras T-08 y T-32 correspondiente a la zona de Mulahuata y Pacla respectivamente.

De acuerdo al análisis de las figuras 4.1 y 4.2 puede observarse también la existencia de muestras cuya composición química es mayoritaria en sulfatos, como muestra de ello se han seleccionado las muestras P-01 y T-25 las cuales afloran en la región central del valle de Colca en una zona denominada Mina Madrigal y una fumarola en el flanco norte del volcán Hualca Hualca respectivamente (ver figura 4.4); el primero de los casos (Muestra P-01) la muestra presenta una temperatura de muestreo de 7.9 °C con cantidades de sulfatos de 274 ppm siendo este el anión mayoritario, así mismo presenta cantidades de Ca, Mg y Na de 70, 13.6 y 7 respectivamente por lo cual puede decirse que es una agua fría que probablemente ha tenido contacto con evaporitas. Por otra parte la muestra T-25 posee un contenido de sulfatos de 1296 ppm lo cual representa el 99% de su contenido químico con 0.6 ppm de HCO<sub>3</sub> y contenido catiónico no mayor a 7 ppm por lo cual puede decirse que se trata de un condensado de vapor o un agua calentada por vapor de la fumarola Pinchollo que aflora en dicha zona de estudio, los diagramas de Stiff para estas muestras pueden observarse en la figura 4.3 distinguidos en color amarillo.

El otro tipo de agua que se ha identificado son aquellas cuyo origen es superficial siendo su característica principal un alto contenido en iones bicarbonato y relativa pobreza catiónica, en este caso se eligen como muestras representativas de este tipo de aguas las G-01 y Fr-12 en cuyos casos presentan temperaturas de muestreo frías de 10°C y 11°C respectivamente y su composición química constituida mayoritariamente del ión bicarbonato con contenidos muy bajo de cloruros y sulfatos y mucha pobreza en cationes que en el primer caso no superan las 8 ppm y en el segundo las 4 ppm, esto indica la naturaleza superficial de dichas aguas las cuales se ubican aflorando a lo largo del cañón de Colca.

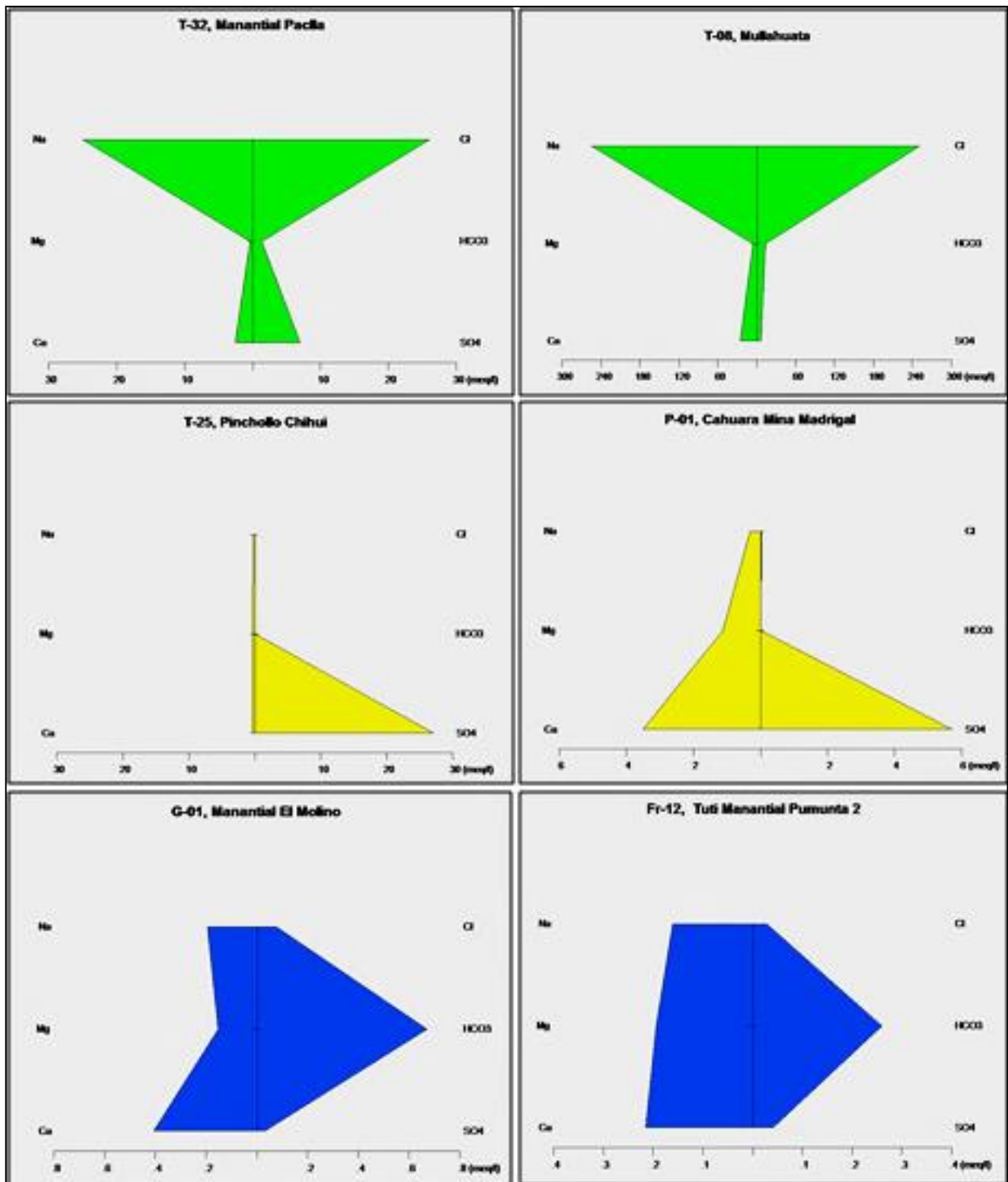


Figura 0.3: Diagramas de Stiff para muestras representativas.

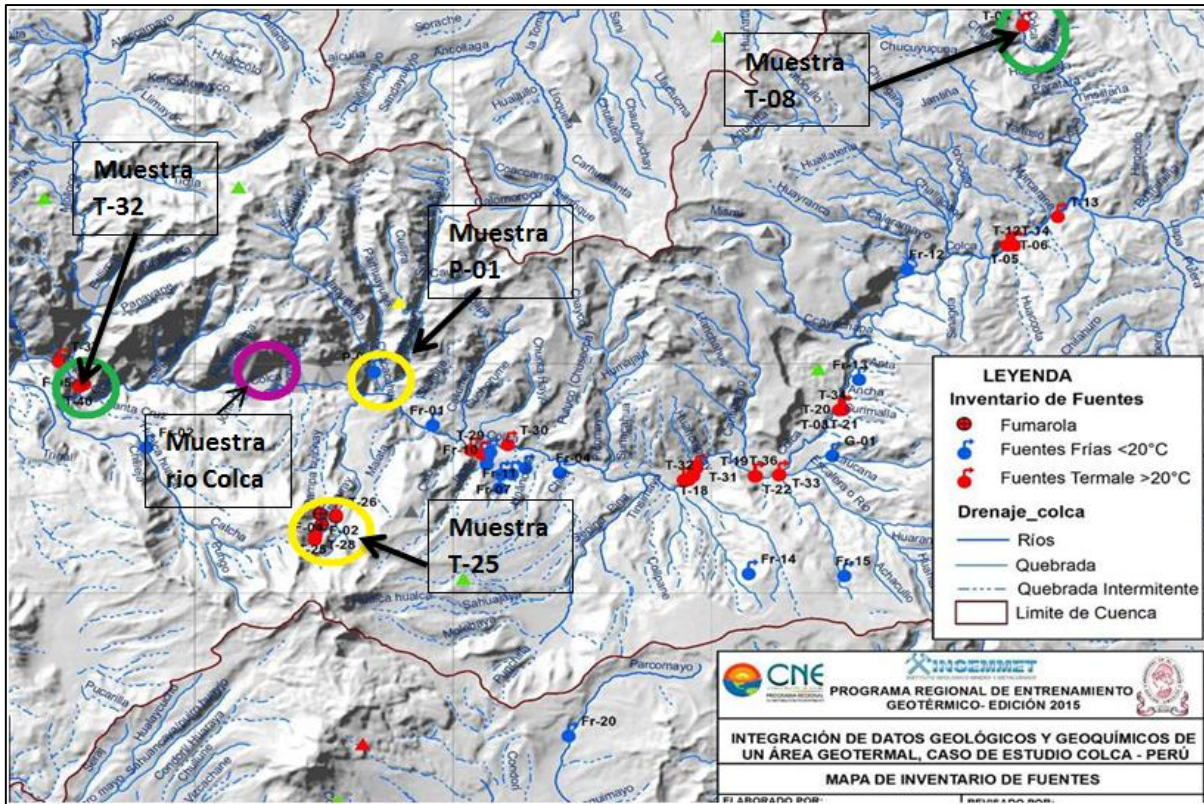


Figura 0.4: Ubicación geográfica de muestras representativas

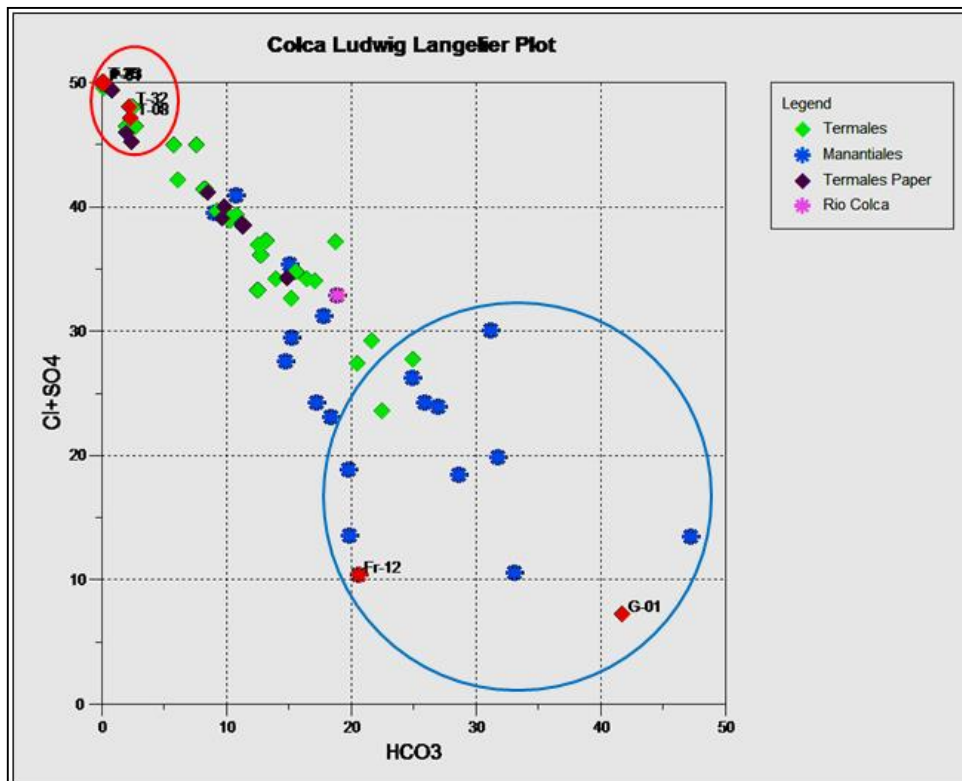
#### 4.4 ANÁLISIS DE MEZCLA DE AGUAS.

Haciendo uso del diagrama de clasificación de aguas de Piper se logran identificar, además de los tipos de agua presentados en la sección anterior, líneas de mezcla existentes entre los distintos tipo de agua; así como la figura 4.1 y 4.2 lo muestran, existen una serie de muestras de tipo cloruradas sódicas las cuales son fuentes termales influenciadas por aguas superficiales y de la misma forma aguas sulfatadas con una influencia de aguas meteóricas bicarbonatadas, esto es completamente congruente con la hidrología y la geografía de la zona ya que la gran mayoría de muestras afloran en el cañón del Colca por lo cual la influencia del río del mismo nombre podría estar contaminando los manantiales de origen profundo ya que como se observa en dichas las figuras la composición del río Colca (muestra identificada por asterisco rosa y ubicada de acuerdo a la figura 4.4) es intermedia evidenciando la influencia de la descarga de aguas geotérmicas sobre el mismo.

Para poder tener aún más evidencia de la existencia de dichas líneas de mezcla o muestras mezcladas, se construyen los diagramas de tipo Langelier de  $\text{HCO}_3$  vrs  $\text{Cl} + \text{SO}_4$  y de  $\text{HCO}_3$  vrs  $\text{Cl}$  como se muestra en las figuras 4.5 y 4.6 respectivamente. En el primer diagrama se observa la distribución de las muestras frías o de carácter superficial concentrada en la parte derecha del gráfico (rico en  $\text{HCO}_3$  y pobre en  $\text{SO}_4$  y  $\text{Cl}$ ) y la concentración de las muestras de carácter sulfatado o clorurado en la parte superior izquierda del mismo, observando además una clara línea de mezcla entre ambos extremos, en donde en la zona media se ubican las aguas del río Colca. La figura 4.6 también pone de manifiesto la existencia de dicha correlación



de mezcla ya que al eliminar del gráfico el valor de sulfatos, se demarcan dos líneas claras de distribución de las muestras existiendo siempre el extremo derecho con las aguas de origen superficial y dos extremos los cuales están constituidos por la muestras con alto contenido de cloruros y bajo contenido de bicarbonatos (extremo izquierdo superior del gráfico) y de las muestras con bajo contenido de cloruros (alto sulfato) y bajo contenido de bicarbonatos (extremo izquierdo inferior del gráfico) con los cuales en ambos casos puede observarse la existencia de una línea de mezcla en cada uno de ellos siendo la más claramente observable la línea de mezcla entre aguas cloruradas y aguas superficiales ya que las aguas del rio colca se ubican sobre dicha línea evidenciando que la influencia de aguas cloruradas de origen geotérmico es bastante significativo.



**Figura 4.5:** Diagrama de Langelier Cloro + Sulfatos

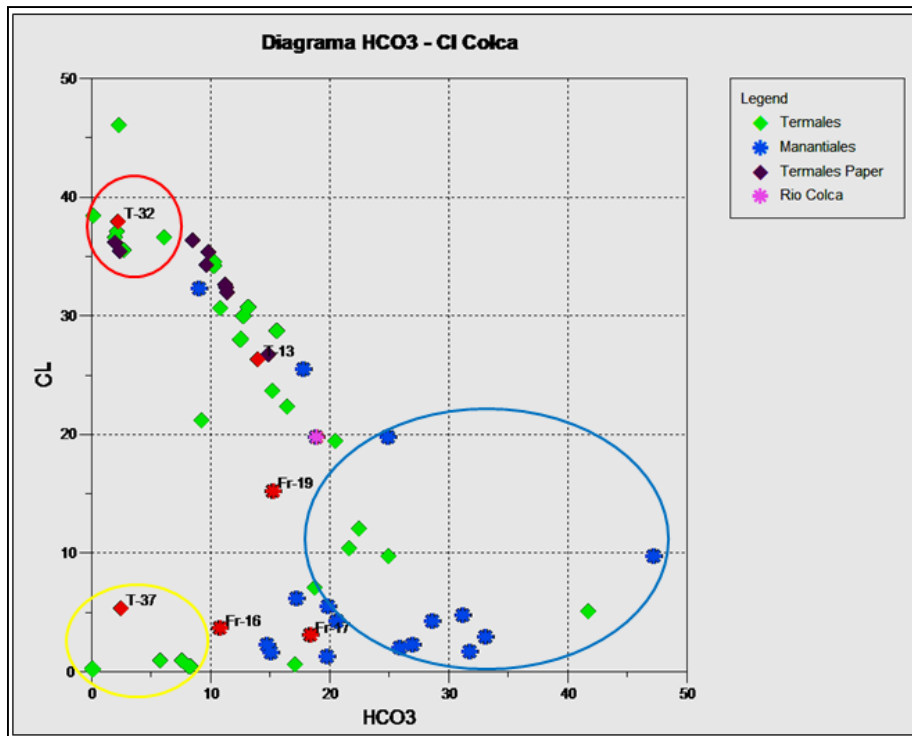


Figura 0.5 Diagrama de Langelier cloruros

#### 4.5 ANÁLISIS DEL ORIGEN DE LAS AGUAS

El establecimiento de los orígenes de las manifestaciones termales presentes en la zona de estudio y analizadas por su geoquímica es de suma importancia para la descripción de la misma, ya que es probable que los fluidos geotérmicos que emergen provengan o no de un mismo reservorio; dicho objetivo se logra mediante la observación de diagramas químicos como los de cloro vrs boro y sodio vrs potasio, basado en el principio de que en el primero de los casos ambas especies químicas son de carácter inerte y conservan la huella del origen en que fueron formados y en el segundo de los casos la relación entre dichas especies químicas se mantienen ya que si bien son especies reactivas hay una gran avidez por el intercambio iónico entre ellas por lo cual sus cantidades relativas mantienen una relación que es trazable a lo largo del camino del fluido. Con el objetivos de definir los orígenes de los fluidos se presentan en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 los diagramas sodio vrs potasio, cloro vrs boro (general y ampliado) respectivamente.

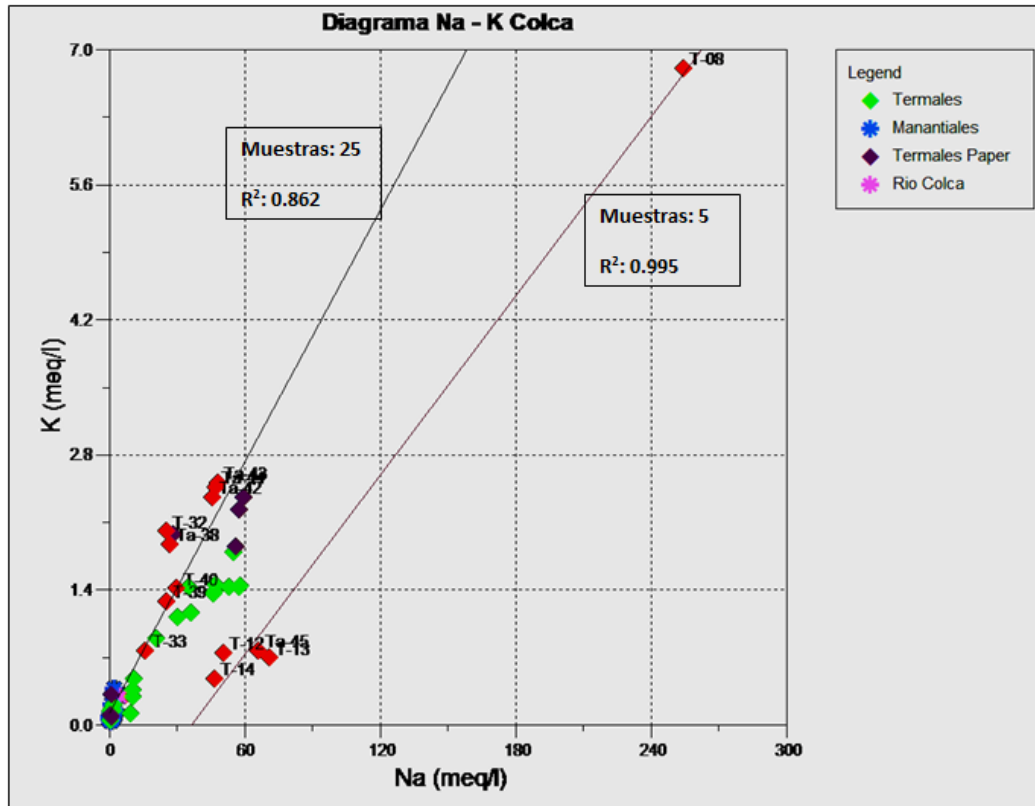


Figura N° 4.7 Diagrama sodio vrs potasio.

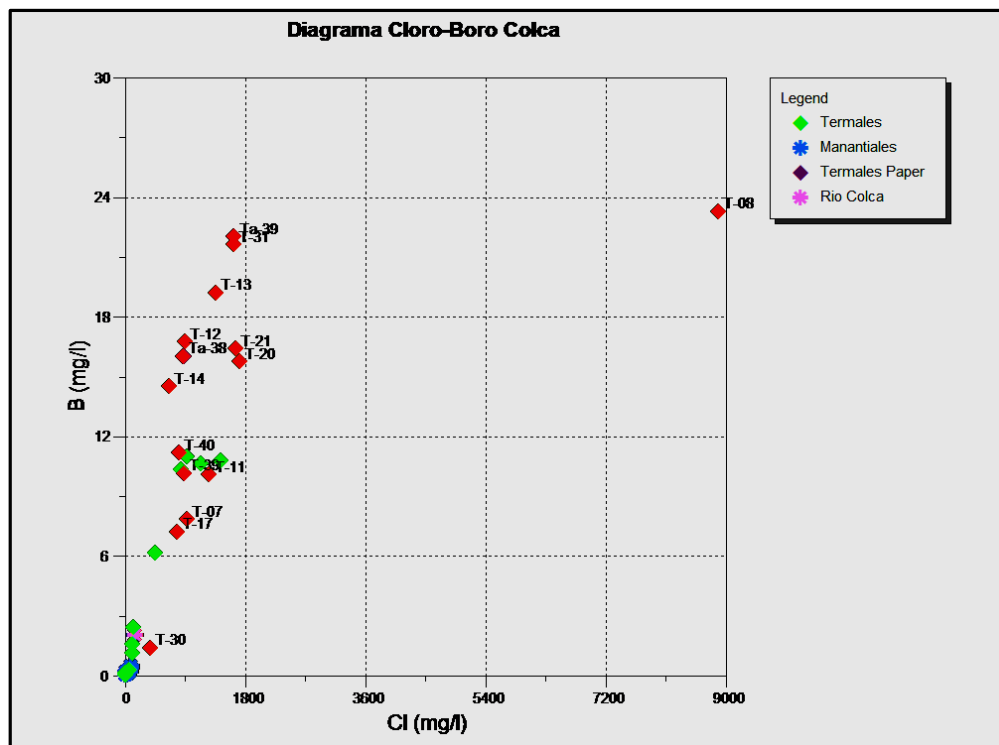


Figura N° 4.8 Diagrama cloro vrs boro para todas las muestras

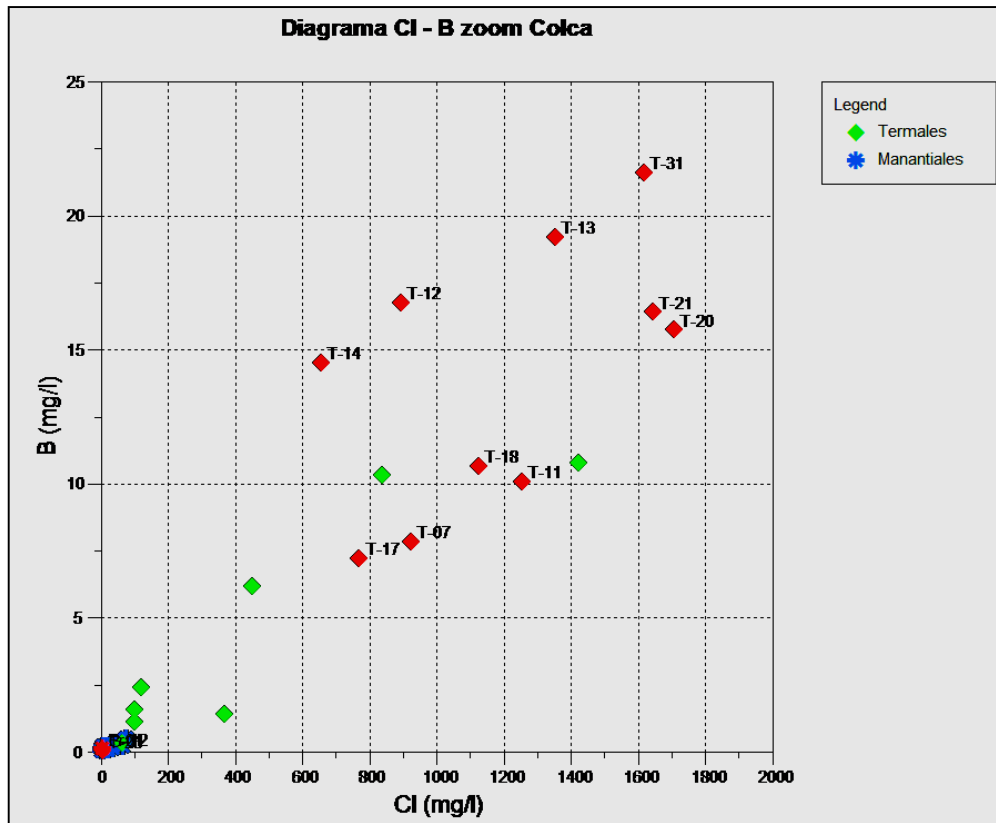


Figura N° 4.9 Diagrama cloro vrs boro ampliado sin incluir muestra T-08.

Como puede apreciarse en la figura 4.7 existe una separación de la línea de tendencia de 4 muestras las cuales son T-12, T-13, T-14 y T-45 las cuales se alinean con la muestra T-08 y todas poseen características geotérmicas sin embargo de acuerdo a la figura poseen un origen común pero distinto al del resto de muestras; la ubicación geográfica de dichas muestras es aguas arriba del cañón del Colca hacia el sur como se muestra en la figura 4.10.

La figura 4.8 muestra la distribución de la relación cloro- boro de cada una de las muestras, sin embargo no puede verse una tendencia clara debido a que la muestra T-08 como se dijo anteriormente posee una gran cantidad de cloro pero una baja concentración de boro el cual pudiese haber sufrido un proceso de evaporación; sin embargo en la figura 4.9 al retirar del gráfico a la muestra T-08 puede observarse que existe la misma tendencia de las muestras mencionadas anteriormente a desplazarse del resto por lo cual es otro elemento que ayuda a definir con mayor certeza la existencia de un origen diferente para esta muestras termales.

La posición geográfica de dicho grupo de muestras mostrada en la figura 4.10 y su diferenciación química demuestra que éstas podrían tener un origen distinto en un sistema geotérmico ubicado hacia el noreste del complejo volcánico de interés y podría estar asociado a un vulcanismo de mayor antigüedad encontrado en dicha zona; de lo cual se concluye que existe un grupo de manifestaciones termales provenientes de un reservorio geotérmico asociado al complejo volcánico reciente Ampato-Sabancaya y otras asociadas a un sistema de mayor antigüedad del cual no se conoce a profundidad hasta el momento.

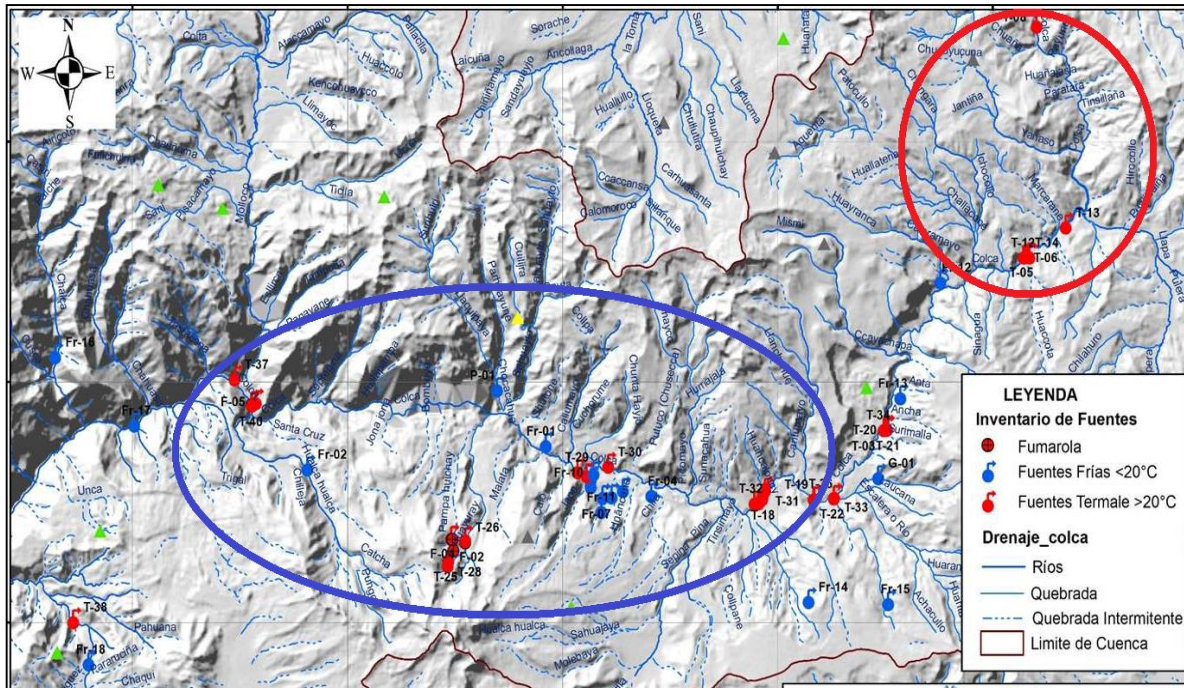


Figura N° 4.10 Ubicación de muestras con química de origen distinto

#### 4.6 GEOQUÍMICA ISOTÓPICA

La composición isotópica de las muestras tomadas en el área de estudio se observa en la figura 4.11 en donde se ubica también la línea meteórica global, la cual sirve como referencia para la comparación isotópica de las muestras; en dicha figura puede verse que la mayoría de muestras de las cuales se dispuso información isotópica se ajustan a la línea meteórica mundial sin embargo existe un grupo de 3 muestras en la parte superior desviadas a la derecha de la línea meteórica dichas muestras son la T-23, T-24 y T-25 las cuales deben su enriquecimiento isotópico a procesos de evaporación debido a que son muestras asociadas a fumarolas que afloran en el flanco norte del volcán Hualca-Hualca; por otra parte también se observa en la figura 4.11 un grupo de muestras asociadas a la T-32 pertenecientes a la zona de Pacla y Cabanaconde las cuales presentan un shift positivo de oxígeno 18 con respecto a la línea meteórica, esto es indicativo de que dichas muestras han tenido enriquecimiento en Oxígeno 18 gracias a procesos de interacción agua-roca en el reservorio a alta temperatura; se muestran también otro grupo de muestras (T-12, T-13, T-14 y T-15) con shift positivo pero a valores más negativos de isótopos los cuales coinciden con el grupo de muestras asociadas al sistema más antiguo por lo cual esto confirma su origen distinto y podría ser indicio de la proveniencia de un reservorio geotérmico de una temperatura inferior ya que su riqueza isotópica también es inferior.

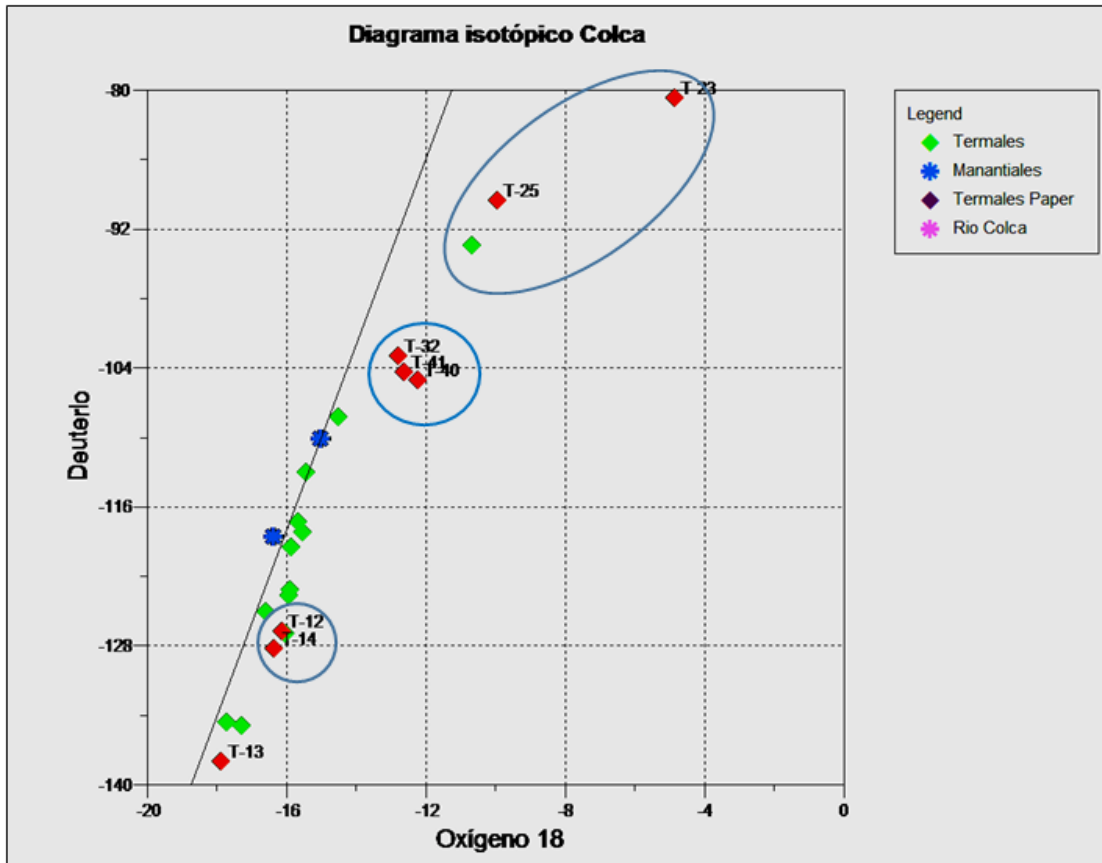


Figura N° 4.11 Distribución isotópica de muestras con respecto a la línea meteórica global

#### 4.6.1 Estimación de la recarga del sistema

Como se vio anteriormente, la composición isotópica de las diferentes muestras colectadas ofrecen información valiosa sobre los procesos físicos sufridos por las aguas en su recorrido, por medio de lo cual es posible estimar la zona en que se recarga el sistema de acuerdo al contenido isotópico de las muestras asociadas a la elevación en la que fueron recolectadas; con dicho objetivo se representan en un gráfico el contenido de oxígeno 18 vrs altura de muestreo para cada una de las muestras de las cuales se disponen datos como se muestra en la figura 4.12, en esta puede notarse que existe una correlación muy buena entre las muestras a pesar de que la gran mayoría de los datos isotópicos disponibles pertenecen a muestras de tipo termal que pudiesen haber perdido su huella isotópica original sin embargo son tomadas en cuenta en el análisis para la realización de una estimación de la recarga del sistema, la cual puede decirse que se ubica a partir de los 4100 msnm iniciando desde la parte baja del complejo volcánico hacia la parte más alta del mismo como se muestra en la figura 4.13 lo cual es coincidente con las zonas de mayor capacidad de infiltración de acuerdo a la hidrogeología (ver figura 3.4).

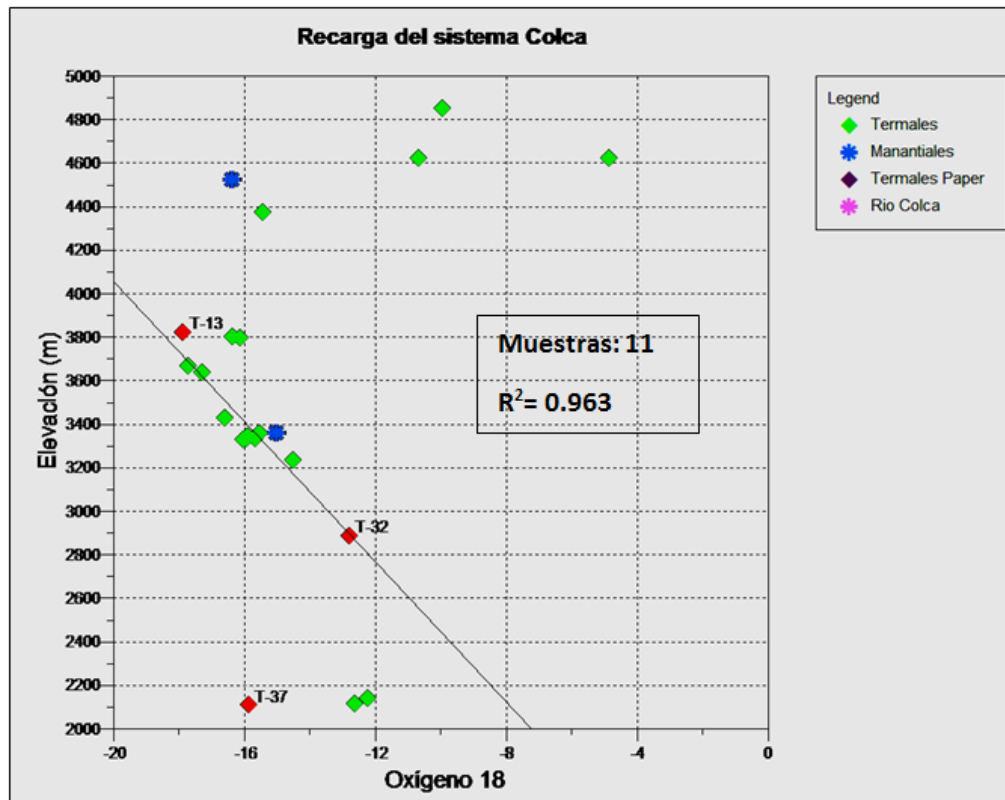


Figura N° 4.12 Estimación de la recarga del sistema.

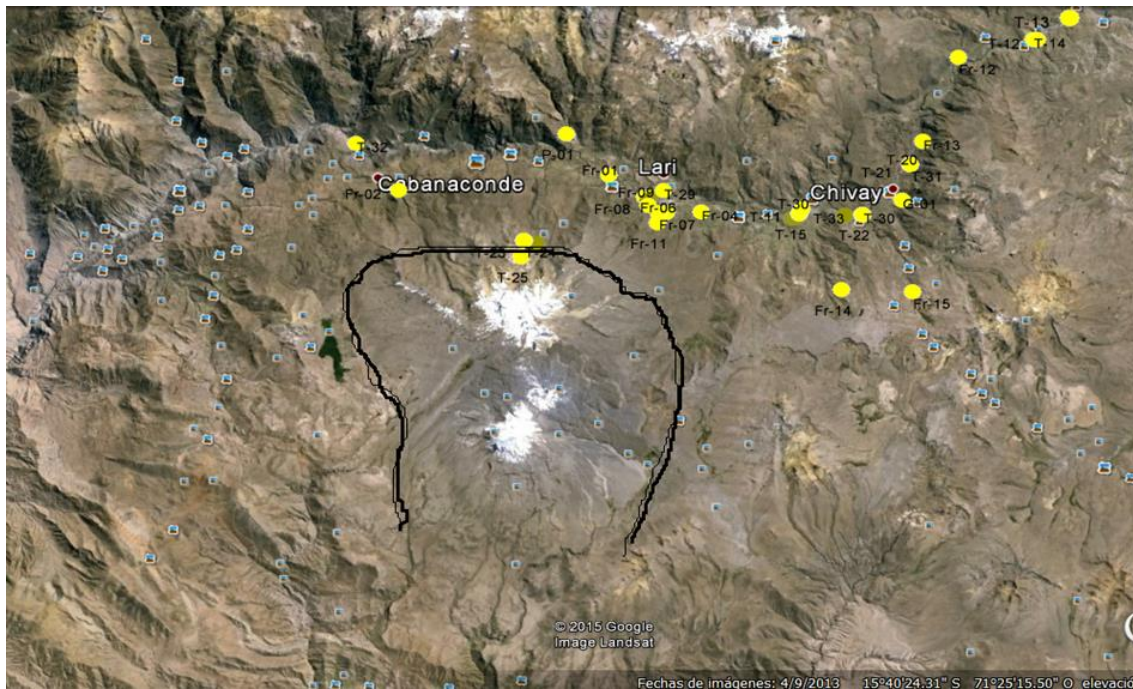


Figura N° 4.13 Delimitación de la zona de recarga del sistema

#### 4.7 DISTRIBUCIÓN ARIAL DE LOS COMPONENTES QUÍMICOS DE MAYOR RELEVANCIA

Para obtener una mejor visualización de la distribución espacial de la química de las manifestaciones y como un elemento auxiliar para la comprensión del comportamiento del sistema y la construcción del modelo geoquímico conceptual, se presentan en las figuras 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 en donde se muestra la distribución areal de las temperaturas de surgencia de las fuentes, cloruros, sulfatos y magnesio respectivamente.

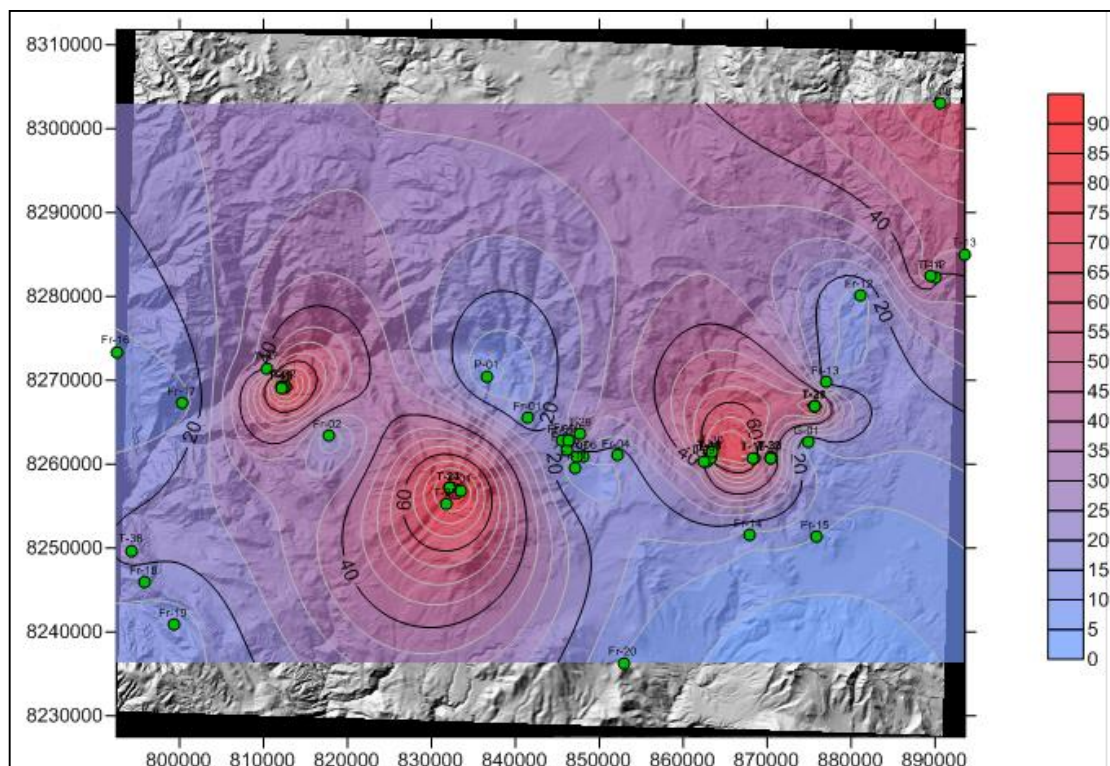


Figura N° 4.14 Distribución areal de temperaturas de surgencia



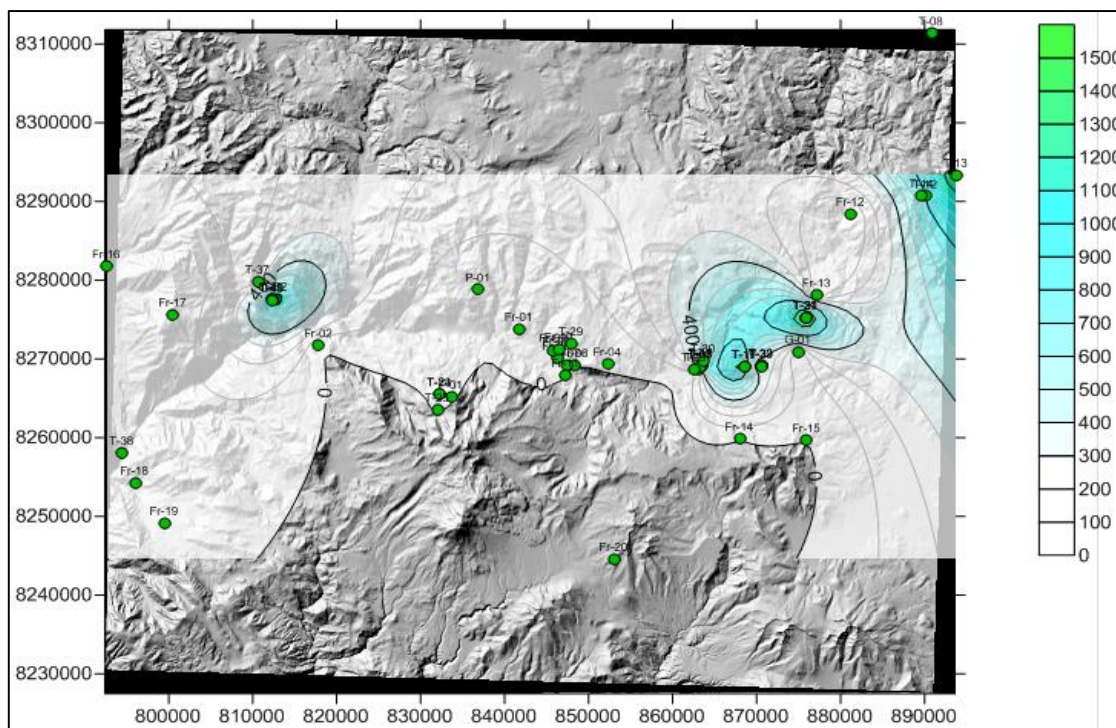


Figura N°4.15: Distribución areal de cloruros

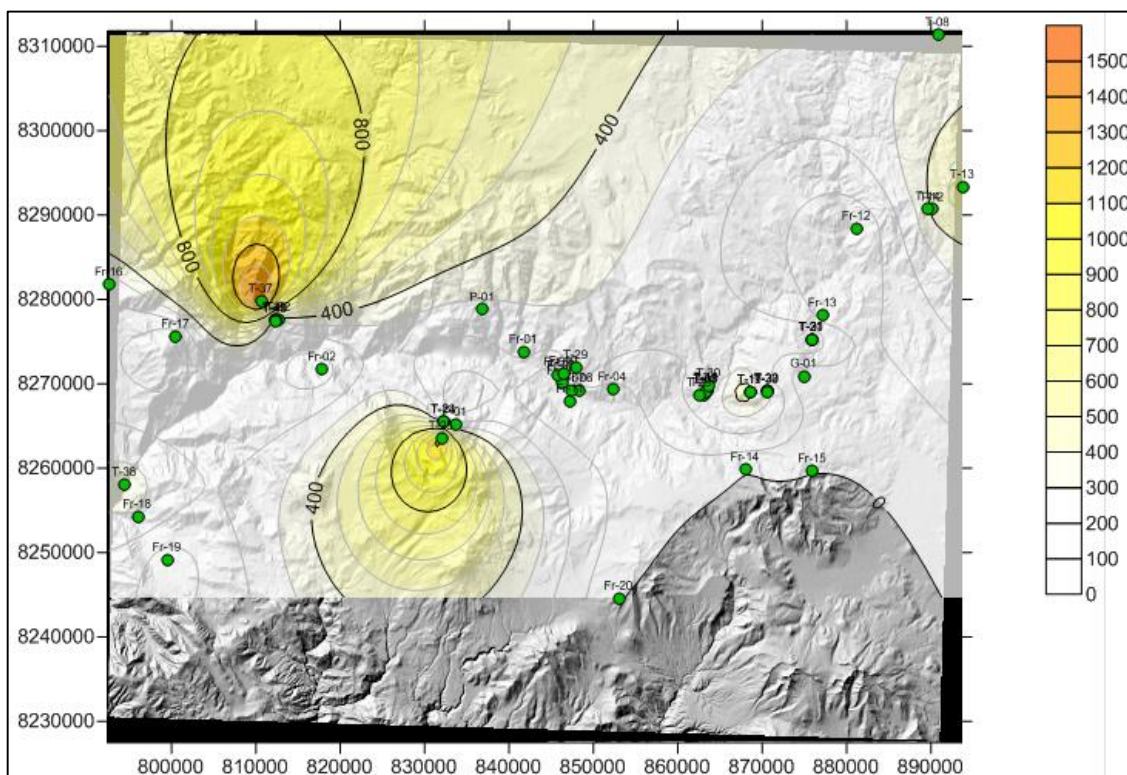
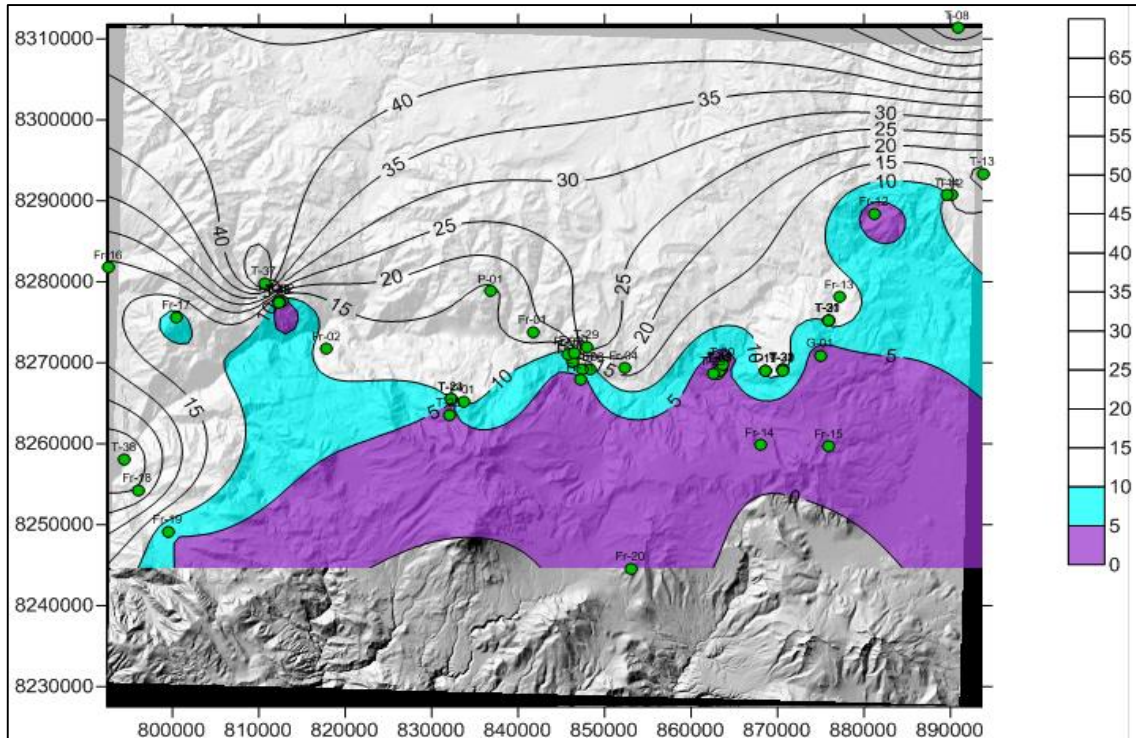


Figura N°4.16 Distribución areal de sulfatos



**Figura N° 4.17** Distribución areal de magnesio

En la figura 4.14 puede notarse que existen anomalías de temperatura demarcadas en cuatro zonas, una de ellas es la zona fumarólica Pinchollo en el flanco norte del volcán Hualca-Hualca en donde la temperatura de surgencia es mayor debido a la naturaleza fumarólica del mismo, otra zona de anomalía de temperatura es la de Paclla Cabanaconde en donde las temperaturas de los manantiales son cercanos a los 90 °C, se observa también anomalía concentrada en la zona del Colca Lodge donde las temperaturas de surgencia son por encima de los 70°C y por último se observa también anomalía en la zona de la muestra T-08 la cual pertenece a otro sistema que se ubica al noreste de la zona de interés. La figura 4.15 muestra los valores anómalos de cloruros a lo largo del sistema (se ha eliminado el valor de la muestra T-08 debido a que su gran cantidad de cloruros causa interferencia visual) en donde se observan ahora 3 áreas anómalas las cuales pertenecen a la zona de Paclla Cabanaconde, Colca Lodge y zona noreste asociada a la T-08 como es notorio bajo este criterio la zona fumarólica de Pinchollo no presenta anomalía ya que se trata de aguas calentadas por vapor y no aguas provenientes directamente del reservorio.

La figura 4.16 muestra la distribución areal de sulfatos donde pueden observarse dos zonas de mayor anomalía las cuales son por supuesto la zona fumarólica de Pinchollo y la zona de Paclla Cabanaconde ya no resaltando de manera significativa las zonas de Colca Lodge y la zona noreste lo cual podría deberse a una conexión más directa del reservorio hacia la zona oeste (Paclla) que hacia la zona este (Colca Lodge). Por último la figura 4.17 también demarca las zonas de Paclla Cabanaconde y Colca Lodge como zonas de bajo magnesio y por ende de alta temperatura, no así la zona noreste asociada a la T-08 la cual presenta valores relativamente mayores en magnesio lo cual podría indicar que se trata un sistema de menor temperatura.

En conclusión puede verse que el sistema geotérmico asociado al complejo volcánico Ampato-Sabancaya presenta dos zonas de descarga de fluidos las cuales son la zona de Paclla Cabanaconde y Colca Lodge y por su parte el sistema asociado a la muestra T-08 en el noreste del complejo volcánico activo presenta características químicas que indican una menor temperatura.

#### 4.8 GEOTERMOMETRÍA

Como pudo observarse en el desarrollo anterior, existen en el sistema diferentes tipos de aguas, de las cuales se han discretizado aquellas cuyas características geoquímicas les confieren un origen geotérmico, dichas muestras son las pertenecientes a la zona de Paclla Cabanaconde, Colca Lodge y zona noreste asociada a la muestra T-08; en la figura 4. 18 se muestra el geotermómetro gráfico de Giggenbach en el cual se han diferenciado las muestras pertenecientes al sistema de Mulahuata asociado a la T-08 (óvalo color azul), las muestras que afloran en la zona de Colca Lodge (óvalo color amarillo) y las que afloran en la zona de Paclla Cabanaconde (óvalo color morado) confirmando con ello que la el primer grupo predice un reservorio de relativamente baja temperatura mientras que los dos subsiguientes muestran un reservorio de alta entalpía entre los 220 y 260 °C observándose una separación entre las muestras de Colca Lodge y Paclla probablemente debido a la influencia mayor de agua superficial probablemente del rio Colca en el primero de los casos.

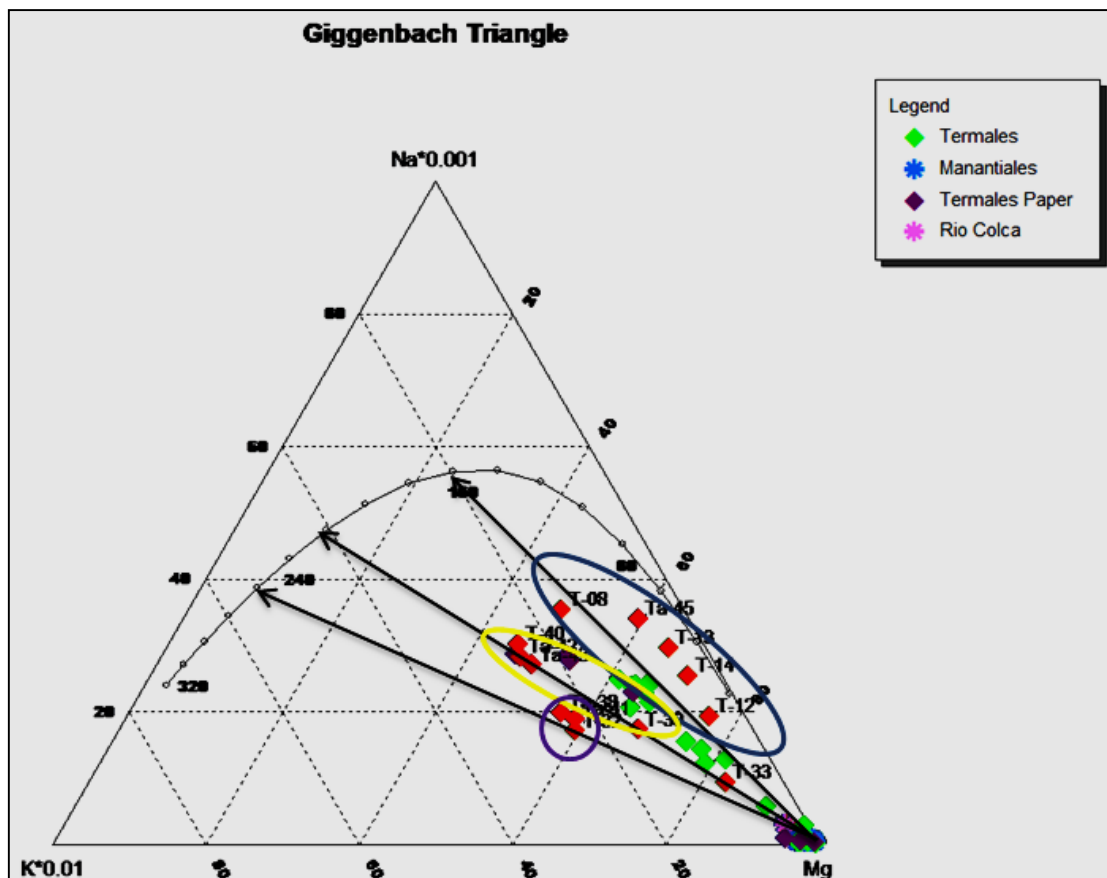


Figura N° 4.18 Geotermómetro gráfico de Giggenbach para la zona de estudio.

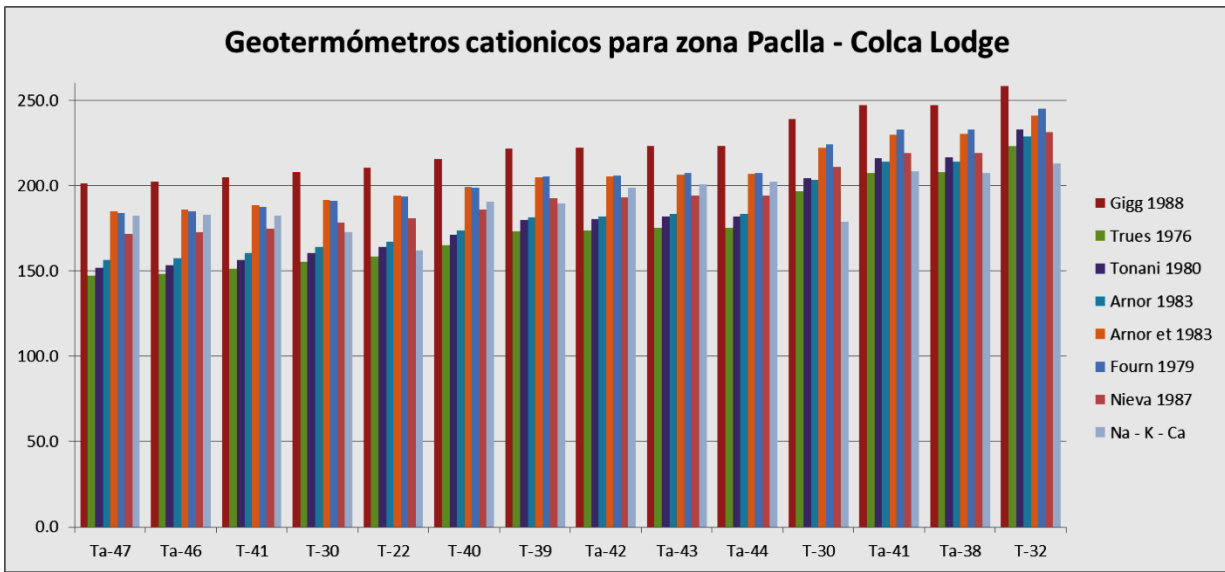
En base a lo anterior y a las características de las aguas, se presenta en la tabla 4.2 el resumen de la geotermometría aplicada a las muestras representativas de todo el sistema, para el cual se aplicaron geotermómetros catiónicos de Na/K (distinguidos por color amarillo) y Na-K-Ca (color azul) así como también geotermómetros de cuarzo (distinguido por color gris); la tabla 4.2 muestra en su parte superior y sombreadas de gris claro a las muestras cuyo origen mayoritariamente es el sistema de baja temperatura asociado a la muestra T-08 y en la parte inferior otro grupo de muestras distinguidas en color rosa pálido las cuales obtienen mayores temperaturas geotermométricas asociadas a las zonas de Colca Lodge y Paclla (distinguidas en azul); existe sin embargo una serie de muestras que evidencian mezcla en las aguas de ambos tipos de sistemas debido a la influencia del río Colca, sin embargo dicha distinción no ha sido delimitable por lo cual se clasifican los sistemas en base a la temperatura.

**Tabla N° 4.2** Presentación de resultados geotermométricos para la zona de estudio

Código	Nombre	Gigg 1988	Trues 1976	Tonani 1980	Arnor 1983	Arnor et 1983	Fourn 1979	Nieva 1987	Four 1977	Four sl 1977	Four&Po 1982	Arnor 1985	Na - K - Ca
T-13	Baños del Inca	120.6	51.3	52.2	63.3	105.9	99.8	89.3	122.1	120.0	206.7	227.7	122.1
T-14	Ipo 2	122.7	53.7	54.7	65.6	108.1	102.0	91.4	117.7	116.2	202.3	223.7	123.6
Ta-45	Baños del inca	129.2	60.8	62.1	72.7	114.4	108.6	97.9					131.5
T-12	Chancadora	141.3	74.6	76.3	86.2	126.2	121.1	110.1	134.7	130.6	219.2	238.8	135.1
T-20	Calera	171.3	109.7	112.9	120.4	155.6	152.3	140.5	115.6	114.4	200.3	221.9	157.0
T-21	Calera	171.5	110.0	113.2	120.7	155.8	152.5	140.8	129.1	125.9	213.7	233.9	156.9
T-08	Mullahuata	176.3	115.9	119.3	126.4	160.5	157.6	145.7	100.4	101.4	185.2	207.8	172.6
T-19	Huallhualica 3	176.8	116.4	119.9	126.9	161.0	158.1	146.2	138.0	133.4	222.6	241.7	161.1
T-16	Baños Chacapi	176.8	116.4	119.9	126.9	161.0	158.1	146.2	157.8	149.9	242.5	258.6	144.1
T-11	Sabancaya	182.6	123.5	127.3	133.8	166.7	164.2	152.1	13.2	23.5	91.1	108.7	165.4
T-15	Mismi	183.1	124.1	127.9	134.3	167.1	164.6	152.6	135.5	131.3	220.0	239.5	166.4
T-18	Puye 2	185.3	126.9	130.9	137.0	169.4	167.0	154.9	131.4	127.8	215.9	235.9	167.7
T-07	Puye 1	187.9	130.1	134.2	140.1	171.9	169.8	157.6	123.0	120.8	207.6	228.5	165.6
T-31	MAC-03-10-27	188.9	131.4	135.6	141.3	172.9	170.8	158.6	107.5	107.5	192.3	214.5	169.3
Ta-39	La Calera	189.8	132.4	136.7	142.3	173.7	171.7	159.5	105.4	105.7	190.2	212.5	170.0
T-29	MAC-03-10-25	192.7	136.1	140.5	145.9	176.6	174.8	162.5	150.7	144.0	235.3	252.6	155.1
T-17	Huallhualica 1	197.4	142.0	146.8	151.6	181.2	179.8	167.4	130.3	126.9	214.8	234.9	166.3
Ta-47	Calera blanca	201.3	147.0	152.0	156.3	185.1	184.0	171.5					182.5
Ta-46	Calera verde	202.4	148.3	153.4	157.6	186.1	185.1	172.6					183.1
T-41	Cabana 2	204.7	151.3	156.5	160.4	188.4	187.5	175.0	107.1	107.1	191.8	214.1	182.2
T-30	MAC-03-10-26	207.8	155.3	160.7	164.3	191.5	190.8	178.2	122.5	120.3	207.1	228.1	172.5
T-22	Refugio	210.3	158.5	164.0	167.3	193.9	193.4	180.7	113.0	112.2	197.7	219.5	162.1
T-40	Cabana 5	215.4	165.2	171.1	173.7	198.9	198.9	186.1	129.1	125.9	213.7	233.9	190.4
T-39	Cabana 1	221.5	173.2	179.6	181.3	204.9	205.4	192.5	174.3	163.5	259.2	272.5	189.6
Ta-42	Colca Lodge	222.1	174.0	180.4	182.1	205.5	206.1	193.1					198.6
Ta-43	Colca Lodge 2	223.1	175.3	181.8	183.3	206.5	207.1	194.1					200.5
Ta-44	Colca lodge 3	223.2	175.4	182.0	183.5	206.6	207.2	194.2					202.1

T-30	Manantial Puye I	239.0	196.6	204.4	203.5	222.1	224.1	210.8	34.3	42.8	116.5	136.9	178.7
Ta-41	Paclla-1	246.9	207.5	216.0	213.8	229.9	232.7	219.1	176.1	165.0	261.1	274.1	208.2
Ta-38	Paclla	247.1	207.8	216.3	214.1	230.1	232.9	219.3	164.4	155.4	249.2	264.3	207.4
T-32	Manantial Paclla	258.1	223.3	232.8	228.6	241.0	244.9	231.1					213.1

Como se vio anteriormente existe un sistema de alta y uno de baja a mediana temperatura para lo cual en las figuras 4.19 a 4.22 muestran la distribución grafica de la aplicación de los diferentes geotermómetros catiónicos y de cuarzo para cada uno de los sistemas a fin de observar la consistencia en la predicción de temperaturas.



**Figura N° 4.19** Geotermómetros cationico para zona de alta temperatura

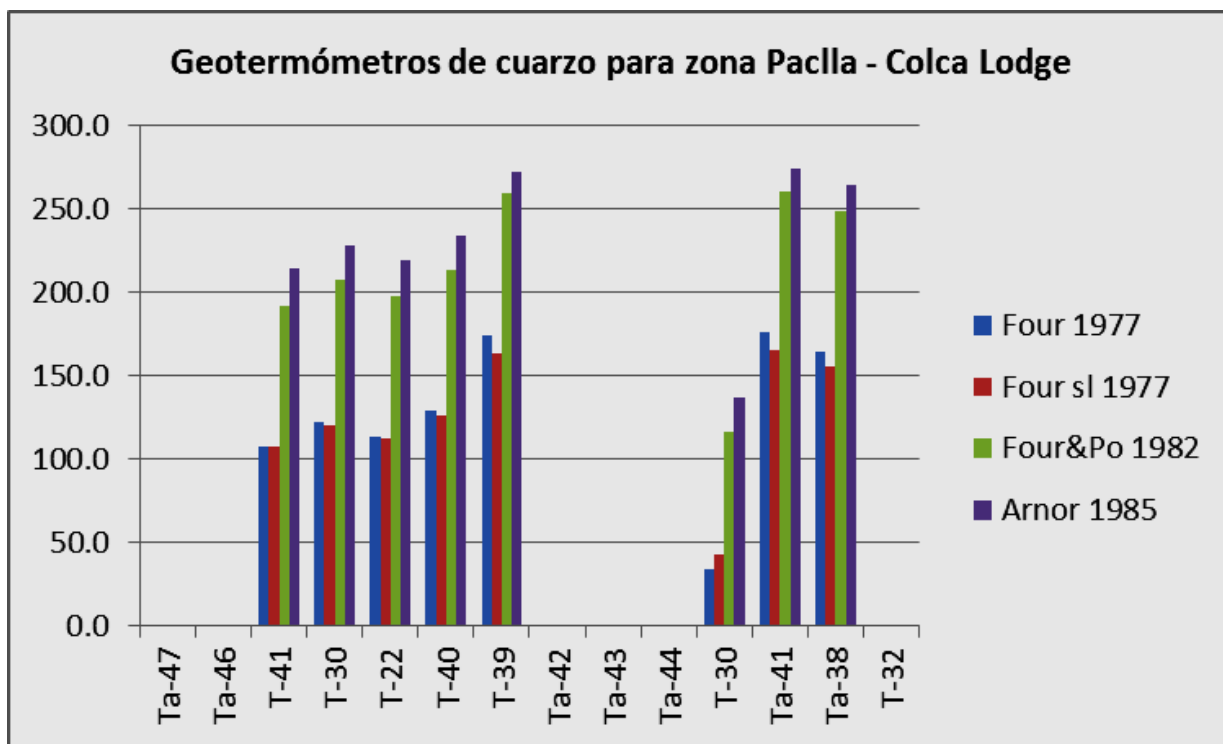


Figura N° 4.20: Geotermómetros de cuarzo para zona de alta temperatura

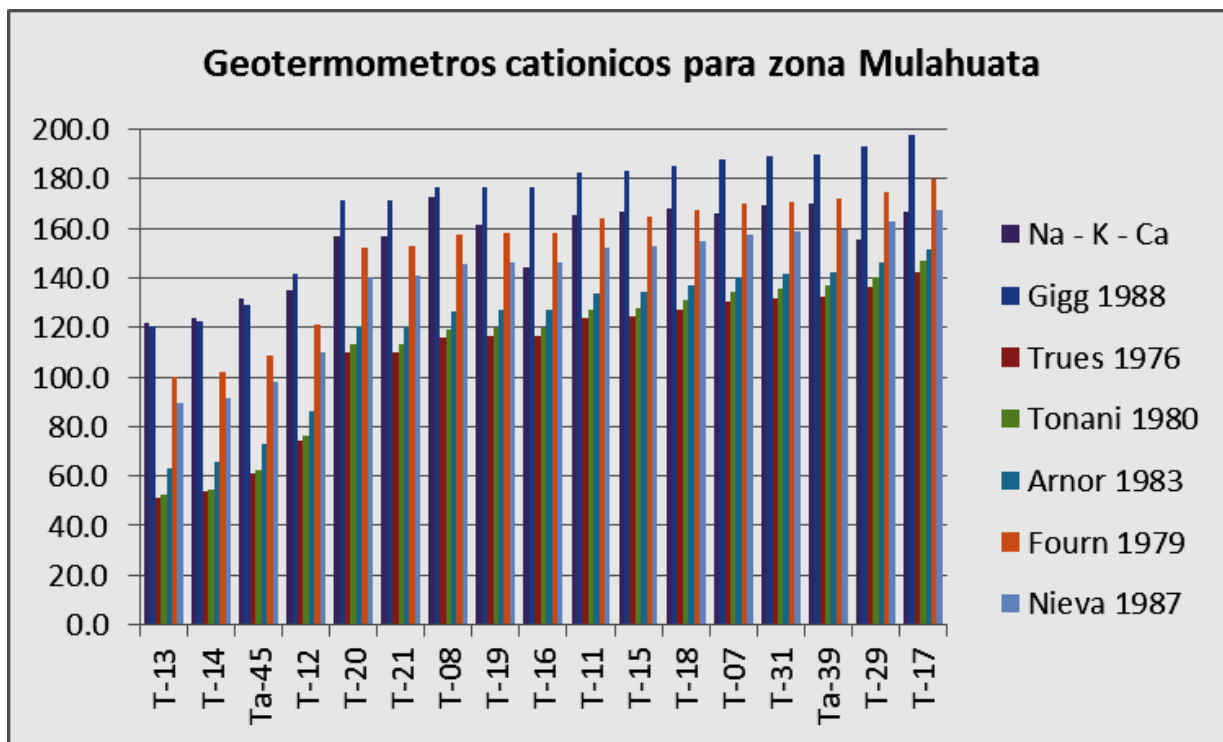


Figura N° 4.21 Geotermómetros cationicos para zona de baja temperatura

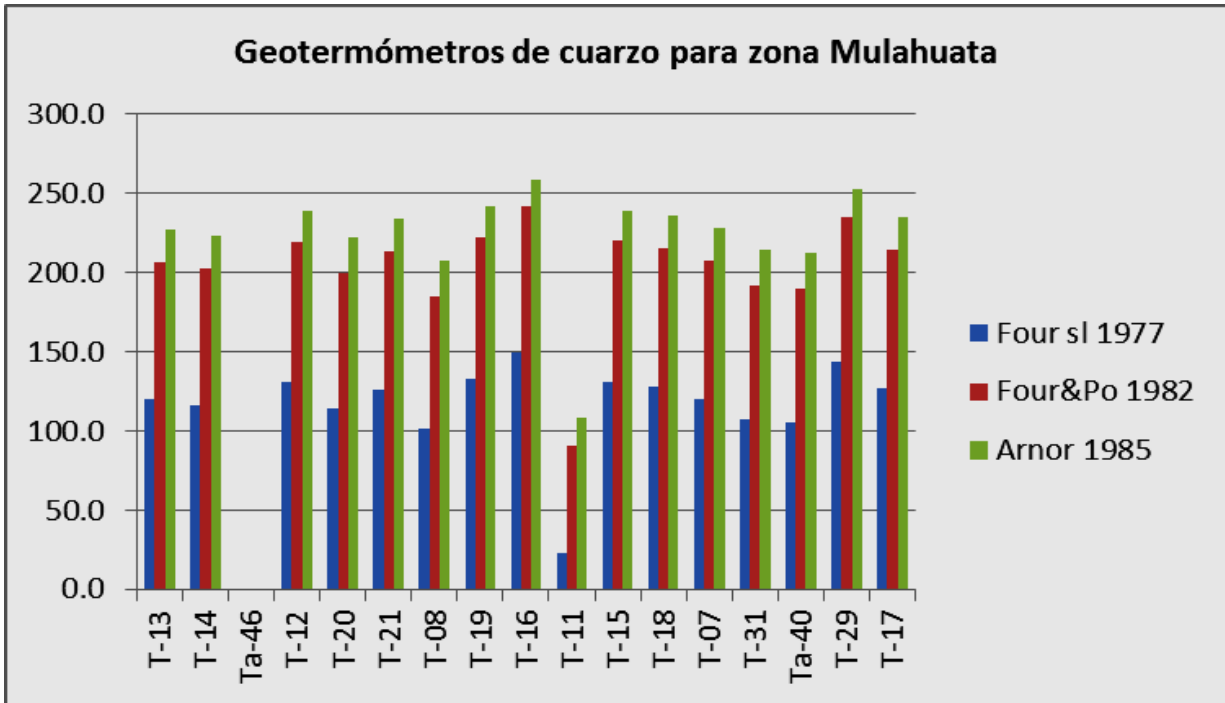


Figura N° 4.22 Geotermómetros de cuarzo para zona de baja temperatura

En base a los resultados anteriores puede decirse que existe un reservorio de alta temperatura entre **220 y 2600 °C** evidenciado por la consistencia en las predicciones geotermométricas de las aguas que afloran en la zona de Paclla y Colca Lodge; así mismo se observa la existencia de un reservorio en la región noreste de mediana temperatura entre los 120 y 160 °C del cual no se conoce mayor información sobre su procedencia.

#### 4.8.1 Geotermómetro de equilibrio mineral

Como parte del análisis geotermométrico a las aguas de la zona, se realizó también mediante el uso del software SOLVEQ CHILLER el equilibrio mineral para la muestra Ta-38 perteneciente a las aguas que afloran en Paclla en la cual como puede observarse en la figura 4.23 se obtuvo una temperatura de equilibrio mineral en un rango aproximado de 180 a 260 °C demarcado por minerales como el cuarzo, zoisita, clinozoisita, microclina, albita y yeso lo cual es concordante con la geología la cual sugiere un reservorio en contacto con areniscas cuarzosas, lo cual se comprueba al observar la figura 4.24 la cual muestra que la gran mayoría (incluida la muestra Ta-38) presentan sobresaturación en cuarzo lo cual soporta la existencia de equilibrio mineralógico en las aguas que descargan en dicha zona y por tanto la predicción de temperatura realizada por esta metodología; En conclusión todos los valores obtenidos por los geotermómetros son consistentes e indican la temperatura profunda de un reservorio de 220 260°C.

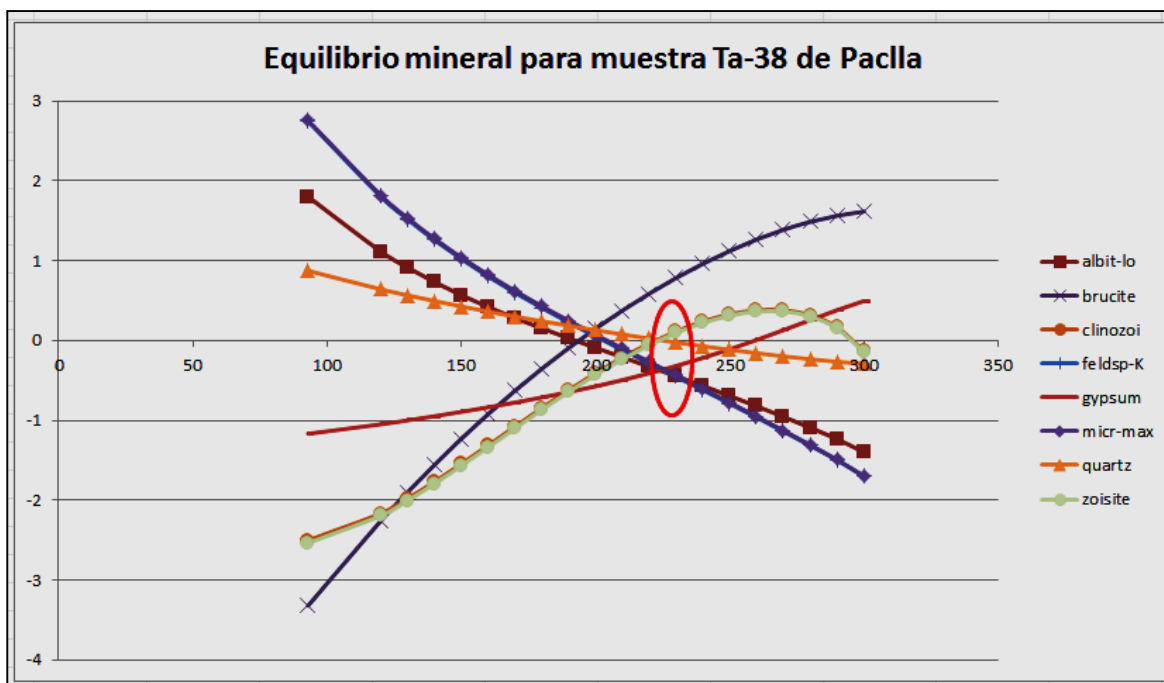


Figura N°4.23 Geotermómetro de equilibrio mineral para muestra de Paclla

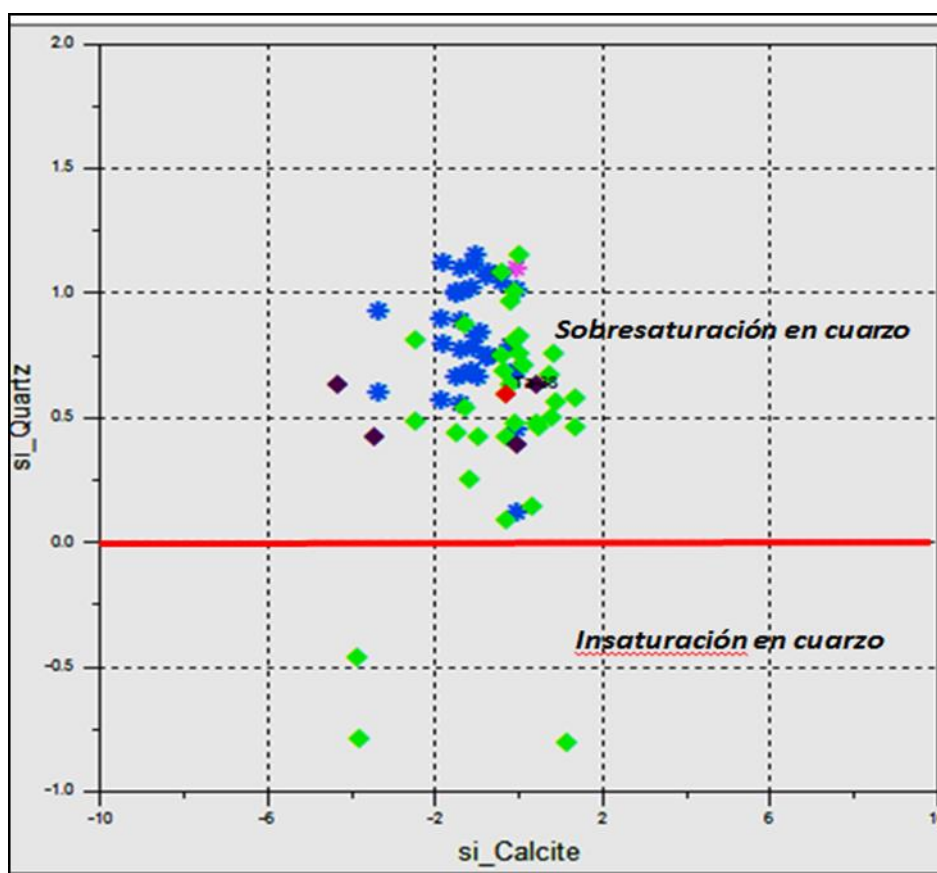


Figura N°4.24 Gráfico de índices de saturación en calcita y cuarzo para muestras.



## **CAPÍTULO V PRESENTACION DE RESULTADOS**

### **5.1 MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO PRELIMINAR**

El modelo conceptual geológico e hidrogeológico preliminar del sistema geotérmico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, se elaboró en base al análisis de la información de caracterización geológica e hidrogeológica descrito en los capítulos II y III. Este sistema geotérmico se ubica en el dominio de la cordillera occidental, donde el tectonismo es controlado por la subducción de las placas de Nazca y Sudamericana, desarrollando importantes controles estructurales regionales, el cual delimitan el área geotermal en estudio.

Las rocas más antiguas corresponden al Complejo Majes Colca compuestos de gneis granítico, por ser una unidad geológica poco permeable se ha clasificado como acuitardo metamórfico; sobreyacen en discordancia angular a este complejo rocas sedimentarias del grupo Yura, importante secuencia de más de 1 000 m de espesor, los cuales se han clasificado como acuíferos fisurados sedimentarios y para las secuencias impermeables como acuitardos, el cual pueden albergar reservorios geotérmicos distales de baja temperatura. Sobre estas unidades geológicas se construye el vulcanismo andino representados por los grupos Tacaza y Barroso, los cuales muestran un contraste bien marcado en su comportamiento hidrogeológico. Los depósitos de piroclastos presentan matriz muy fina con un buen porcentaje de cenizas volcánicas, caracterizando como material impermeable. Los flujos de lava recientes, productos del volcán Hualca Hualca (ver sección geológica) tienen permeabilidad secundaria adquirida por el enfriamiento de las lavas durante su emplazamiento, estos favorecen la infiltración de aguas de lluvia y circulación a través de las fracturas por lo cual se caracteriza como acuíferos volcánicos (Peña et al 2010). Es posible que en los materiales permeables de los volcánicos del Grupo Tacaza se encuentre el reservorio geotérmico y confinando a este, los materiales poco permeables del Tacaza intermedio (formación Orcopampa) que podrían constituir la capa sello de reservorio por presentan características favorables por el tipo de material que los conforman.

Estructuralmente se encuentra circunscrita al sistema de fallas normales preferentemente de dirección NE-SO, asociados a zonas de mayor debilidad que estaría controlando el ascenso del magma del sistema Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca y las manifestaciones termales en la localidad de Yanque (T-07, T-11, T-15, T-16 y T-18); el sistema de fallas NO-SE controla las secuencias sedimentarias del Jurásico-Cretácico y a las manifestaciones termales de Paclla, al NE de Cabanaconde (T-32, T-37, T-39, T-40, T-41). Así mismo el sistema de fallas E-O controla a los domos monogenéticos de Andahua y Puye Puye, el cual guarda relación con el estratovolcán Hualca Hualca, (Figura N° 5.1).

Los límites de este sistema geotérmico, están controlados por los sistemas de fallas de rumbo andino y fallas transversales a este sistema. Es así que al este, se encuentra limitado por la falla Sepiña, al oeste por el borde del posible colapso lateral y al norte limitado por el valle del río Colca.

De acuerdo a este análisis, el origen de las surgencias de las fuentes termales al noreste de la localidad de Yanque (T-5, T-6, T-8, T-12 y T-14) provendría de otro sistema geotérmico, relacionados a complejos volcánicos más antiguas.

## MODELO GEOLÓGICO CONCEPTUAL

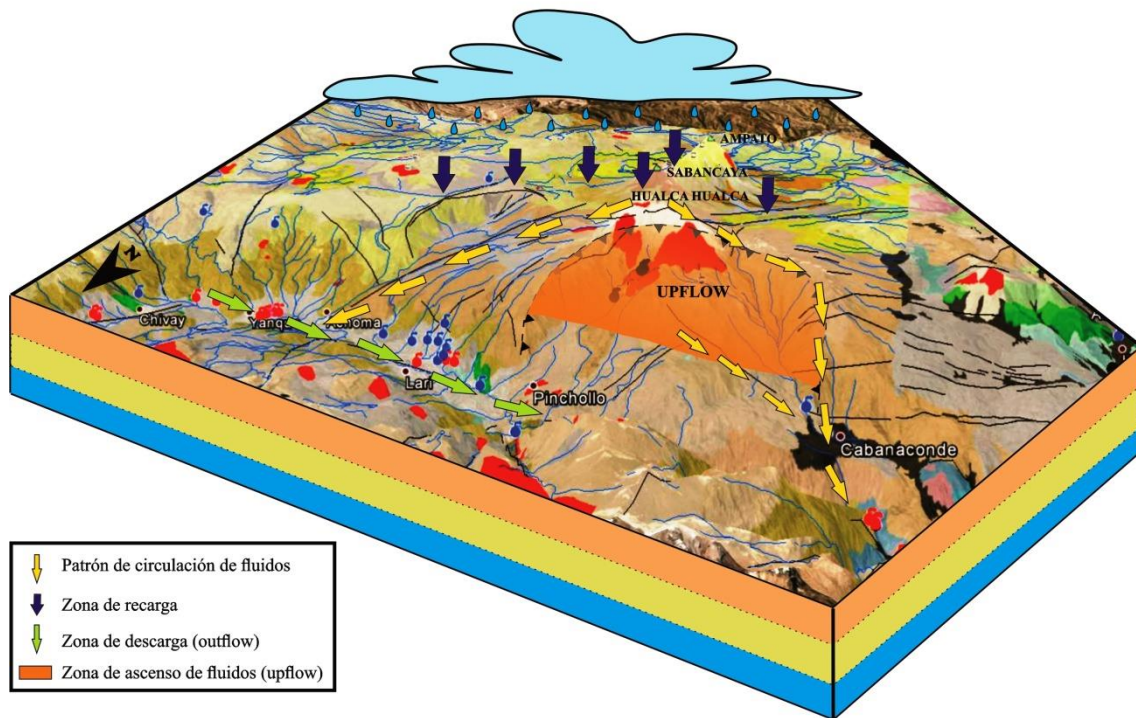


Figura N° 5.1 Modelo conceptual geológico e hidrogeológico.

La intersección de estos sistemas de fallas generan zonas permeables que facilitan el ascenso de los fluidos geotermales (upflow), estas zonas se encuentran evidenciados en superficie por la intensa alteración hidrotermal y las manifestaciones termales y fumarólicas en los sectores de Puye Puye - Hualca Hualca.

La zona de recarga se localiza principalmente en los domos volcánicos de Ampato Sabancaya y Hualca-Hualca, generando dos tipos de flujos sub-superficiales e intermedios-regionales, el primero está condicionado por los subsistemas donde el movimiento del agua subterránea, está en función de la pendiente del terreno, muy cerca de la superficie y condicionados por los regímenes estacionarios es decir menor tiempo de residencia en el acuífero y corta circulación. Los flujos Intermedios-regionales están limitados por la cuenca hidrogeológica que separa a dos sistemas, el sistema integra los flujos sub-superficiales e Intermedios-regionales, donde parte del agua de precipitación infiltra y atraviesa las rocas permeables, y percola aprovechando las fracturas y fallas a acuíferos más profundos, estos flujos profundizan hasta ponerse en contacto con la fuente de calor donde retornan hacia la superficie en forma de manifestaciones termales y fumarolas, el mismo que se evidencia con análisis geoquímico ver figura 5.2.

A continuación se detallan las características principales del modelo geológico e hidrogeológico del sistema geotermal, (Cuadro 5.1 y figura 5.2).

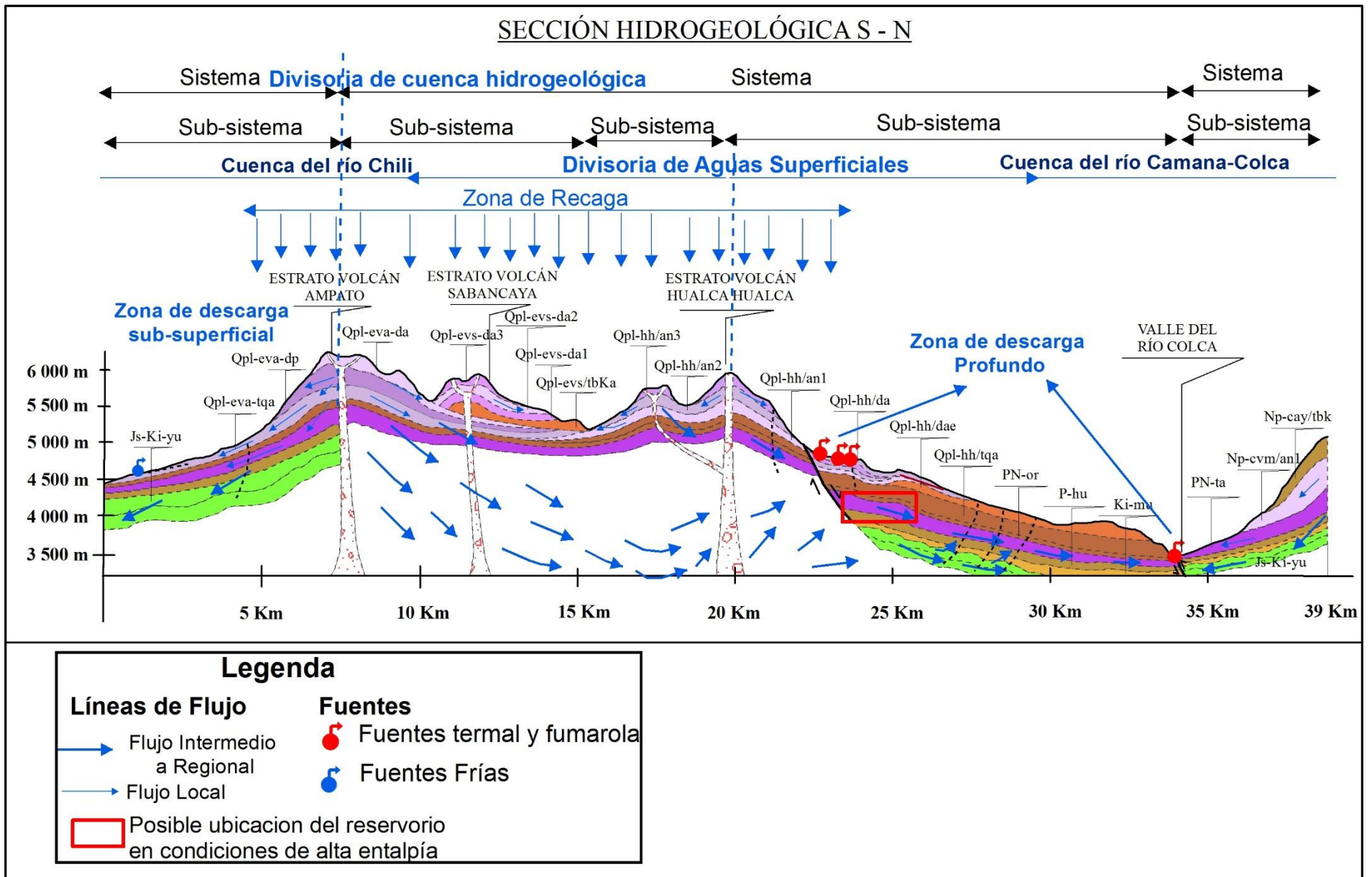


Figura 5.2 Sección geológica e hidrogeológica del sistema geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

**Fuente de calor.** Está asociado a la actividad volcánica del cuaternario de los estratovolcanes Hualca Hualca y Sabancaya, de composición andesítica-dacítica.

**Reservorio.** El reservorio geotérmico de acuerdo al análisis geológico- hidrogeológico estaría relacionado a la Formación Tacaza Inferior (Indiviso) que pertenecen a depósitos permeables como posible acuífero que alberga los fluidos geotermales, esta formación está compuesta principalmente por lavas andesíticas a traquibasálticas e intercaladas con tobas con porosidad y permeabilidad evidente. Cabe señalar que esta unidad se infiere por debajo de los eventos eruptivos del complejo Hualca Hualca, Sabancaya y Ampato, debido a que en muchos sectores del área de estudio se mantienen la secuencia basal del grupo Tacaza.

**Capa sello.** La capa sello posiblemente lo conforma la formación Orcopampa del grupo Tacaza, constituido por niveles de tobas amarillentos y brechas volcánicas, intercalados con areniscas medias a finas y limolitas amarillentas alteradas, por sus características impermeable se definió como capa sello del reservorio geotérmico.

**Zona de ascenso de fluidos (upflow).** Se ubica en el flanco norte del estratovolcán Hualca Hualca, en el sector de Puye Puye, esta zona se encuentra controlada por la intersección de los sistemas de fallas dominantes en el área de estudio y se encuentra limitado por el área semicircular de la posible caldera lateral y/o falla Sepina.

**Patrón de circulación.** En patrón de circulación de fluidos siguen la dirección de los sistemas de fallas NE-SO y NO-SE; controlando las manifestaciones termales de los sectores de Yanque, Pacla y del noreste de Cabanaconde.

**Zona de recarga.** Se encuentra relacionada a las partes altas del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca. Constituido por los nevados del mismo nombre.

**Zona de descarga (outflow).** Los fluidos subterráneos siguen los patrones estructurales de dirección NE-SO y NO-SE, descargando al norte del sistema, en el Valle del río Colca.

**Cuadro N° 5.1.** Características geológicas del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

ÁREA GEOTERMAL AMPATO-SABANCAYA-HUALCA HUALCA	
ASPECTO	GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA
<b>Fuente de calor</b>	Está asociado a la actividad volcánica del cuaternario de los estratovolcanes Hualca Hualca y Sabancaya, de composición andesítica-dacítica.
<b>Reservorio</b>	Podría estar alojado en lavas andesíticas a traquiandesíticas fisuradas del miembro inferior del grupo Tacaza (formación Indiviso). Hidrogeológicamente esta formación es clasificado como acuífero fisurado volcánico.
<b>Capa sello</b>	Constituido por niveles tobáceos amarillentos y brechas volcánicas intercalado con areniscas medias a finas y limolitas alteradas de la Fm. Orcopampa. Hidrogeológicamente esta formación es clasificado como acuitardo volcánico sedimentario.
<b>Zona de ascenso de fluidos (upflow)</b>	Se ubica en el flanco norte del estratovolcán Hualca Hualca, en el sector de Puye Puye, esta zona se encuentra controlada por la intersección de los sistemas de fallas dominantes en el área de estudio y se encuentra limitado por el área semicircular de la posible caldera lateral y/o falla Sepina.
<b>Patrón de circulación de fluidos</b>	En patrón de circulación de fluidos siguen la dirección de los sistemas de fallas NE-SO y NO-SE; controlando las manifestaciones termales de los sectores de Yanque, Pacla y del noreste de Cabanaconde.
<b>Zona de recarga</b>	Se encuentra relacionada a las partes altas del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca. Constituido por los nevados del mismo nombre.
<b>Zona de descarga (outflow)</b>	Los fluidos subterráneos siguen los patrones estructurales de dirección NE-SO y NO-SE, descargando al norte del sistema, en el Valle del río Colca.

## 5.2 MODELO CONCEPTUAL GEOQUÍMICO

En base a la información procesada, analizada y presentada en las secciones anteriores, se construye el modelo geoquímico conceptual en el cual se plasman los principales aportes que la información química e isotópica de aguas disponible para el sistema ofrece. En las figuras 5.3 y 5.4 se observan los patrones de flujo de fluidos calientes (flechas rojas borde azul), fríos (flechas color azul) y mezclas (flechas de color azul a celeste a medida la mezcla tiene más influencia de aguas geotérmicas) definidos por la química de las aguas, así como la zona de ascenso de fluidos asociada a la fuente de calor del complejo volcánico Ampato – Sabancaya - Hualca Hualca, se muestra también la existencia de otra zona de afloramiento de fluidos calientes relacionados a un sistema geotérmico probablemente asociado a vulcanismo más antiguo en el este de la zona de interés así como la recarga y descarga del sistema definidas por la interpretación geoquímica e isotópica, mostrando también la estimación de la temperatura del reservorio el cual ha sido soportado mediante geotermometría catiónica, de sílice y mineral.

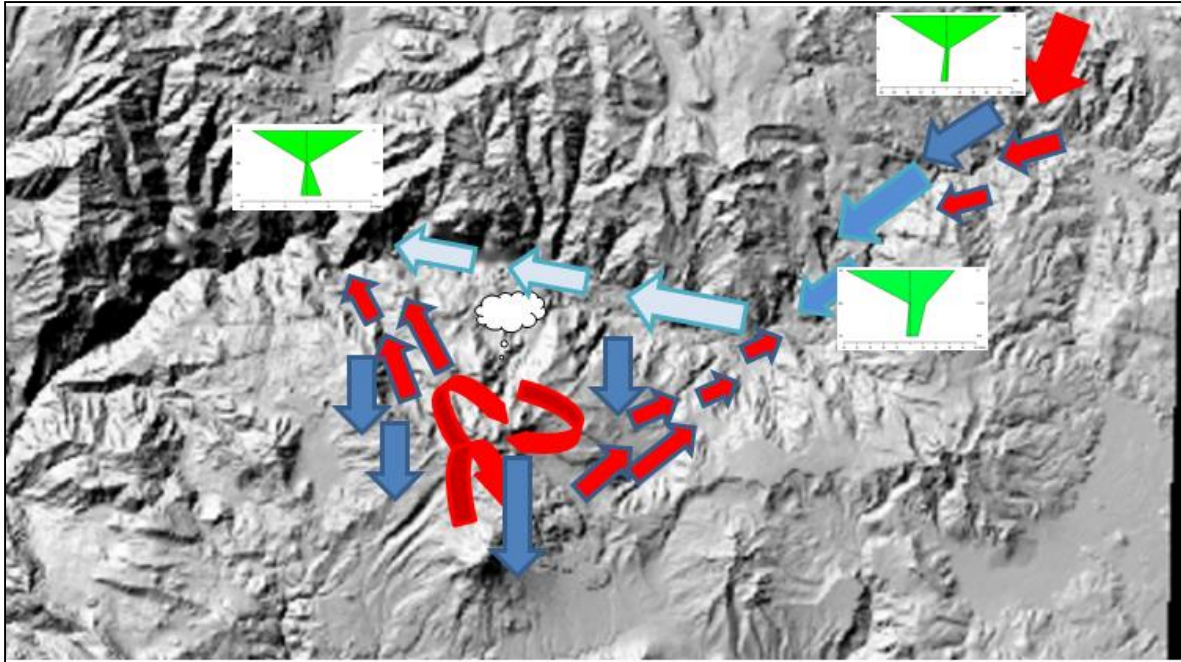


Figura N° 5.3 Modelo conceptual geoquímico, (vista de planta).

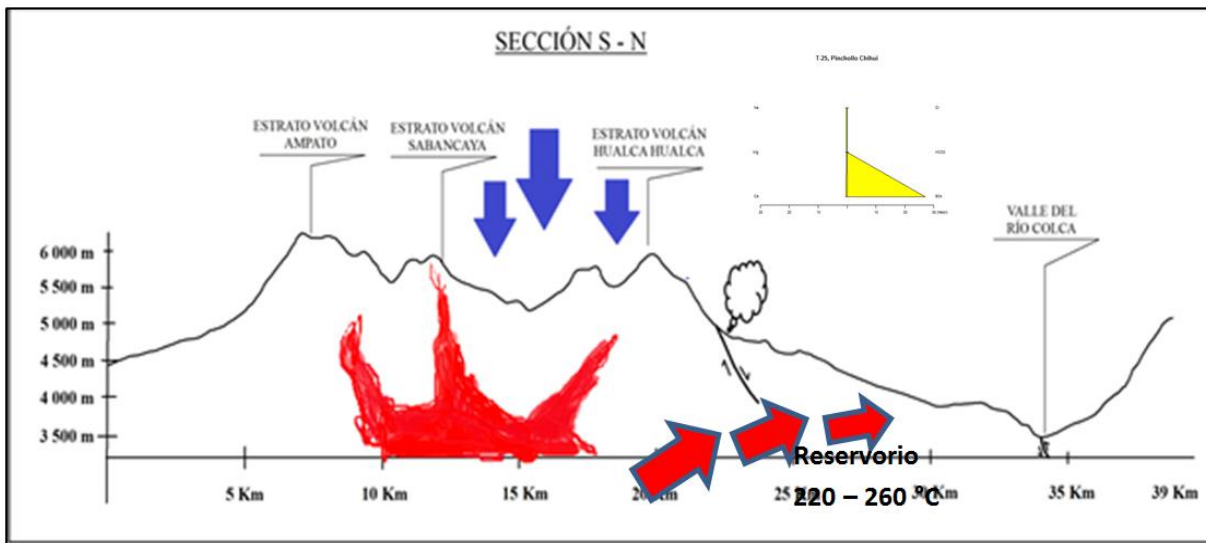


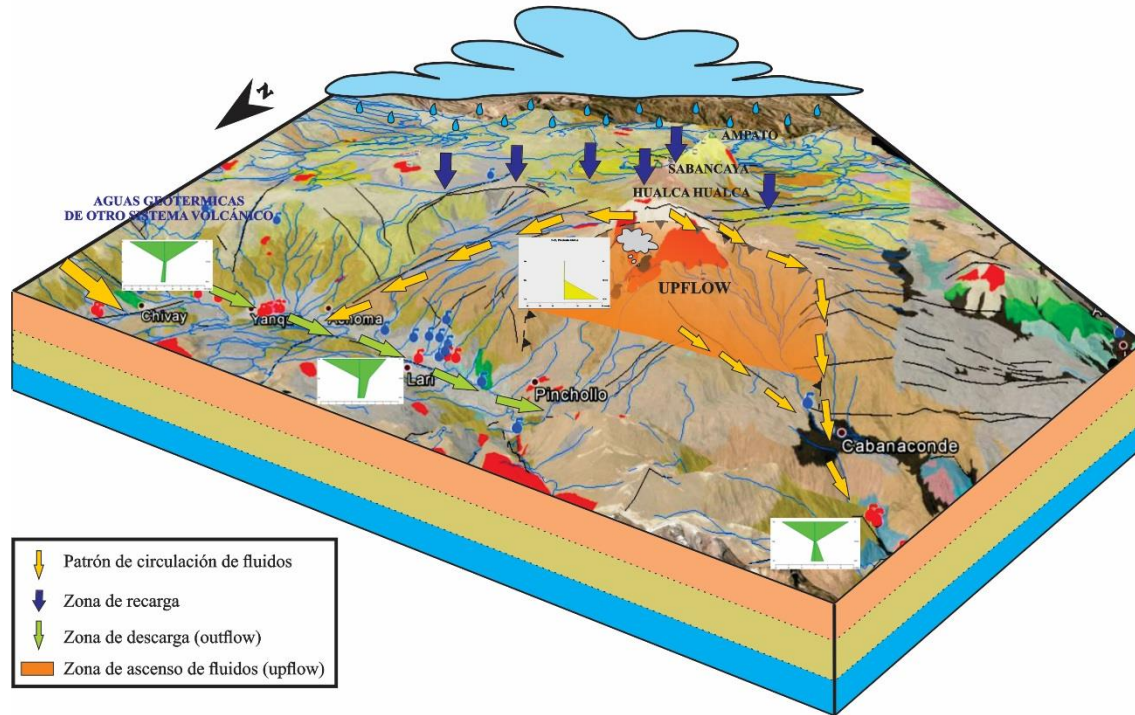
Figura 5.4 Modelo geoquímico conceptual (perfil N-S).

### 5.3 MODELO CONCEPTUAL INTEGRADO

De acuerdo a la interpretación geológica, estructural e hidrogeológica del área de estudio y la interpretación geoquímica de las manifestaciones termales y fumarólicas; se ha determinado que el origen de estas fuentes se encuentran asociados a diferentes sistemas geotérmicos. Las fuentes ubicadas en las localidades de Paclla, Puye Puye, Yanque e Ichupampa estarían relacionadas al sistema geotérmico del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca; y las

manifestaciones termales al noreste de Chivay en las localidades de Sibayo Rumillacta asociados a otro sistema volcánico por definir, (Figura N° 5.5).

## **MODELO CONCEPTUAL INTEGRADO**



**Figura 5.5** Modelo conceptual integrado del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

En el presente capítulo se muestra la integración y análisis de la información generada a partir del estudio geológico, hidrogeológico y geoquímico del área geotermal ubicado en el complejo Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, (Figura 5.6). Así mismo en el cuadro 5.2, se detalla los principales elementos de este sistema geotérmico.

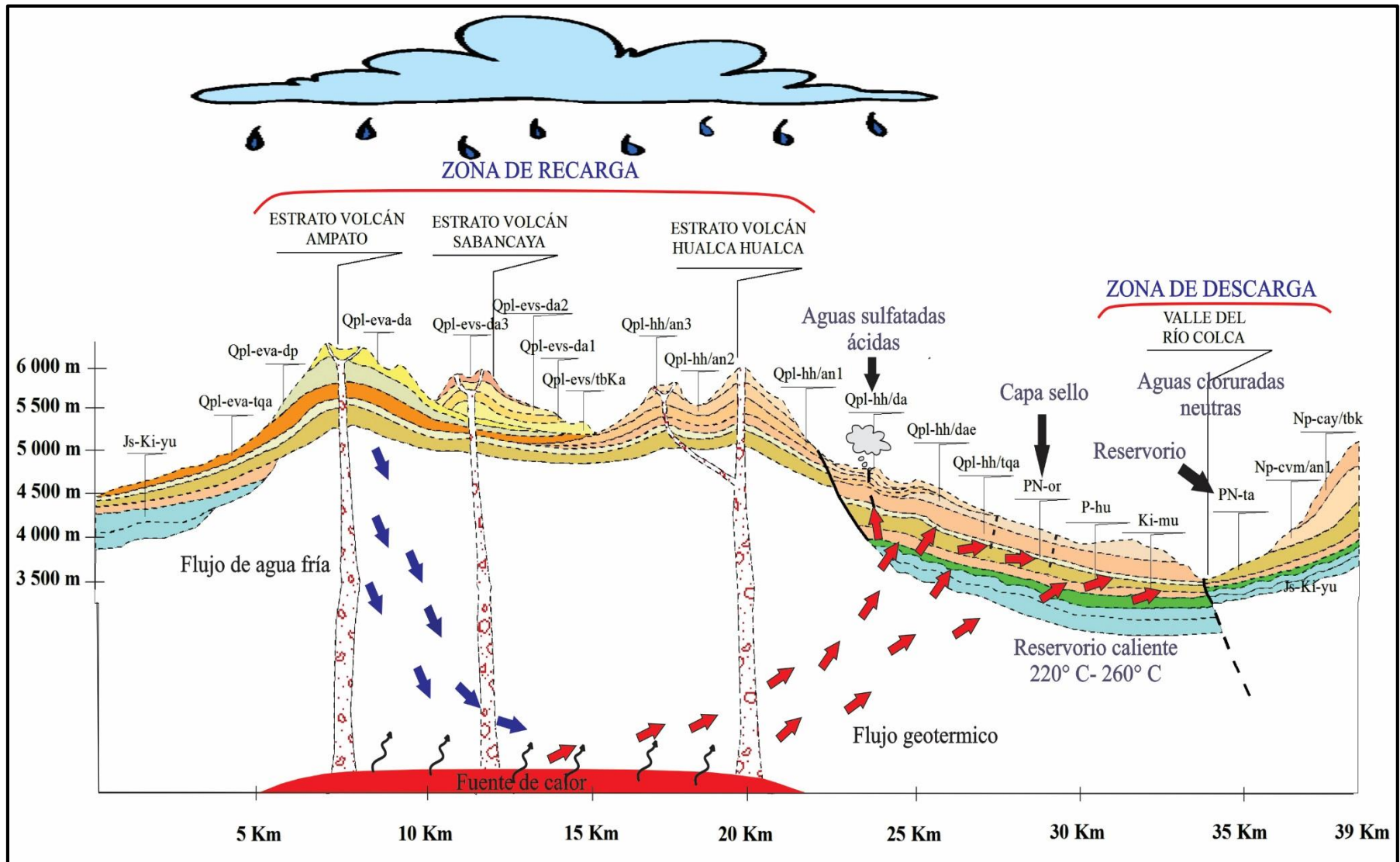


Figura 5.6 Modelo conceptual integrado del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.



**Cuadro 5.2.** Características geológicas y geoquímicas del área geotermal Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca.

<b>ÁREA GEOTERMAL AMPATO-SABANCAYA-HUALCA HUALCA</b>		
<b>ASPECTO</b>	<b>GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA</b>	<b>GEOQUÍMICA</b>
<b>Fuente de calor</b>	Está asociado a la actividad volcánica del cuaternario de los estratovolcanes Hualca Hualca y Sabancaya, de composición andesítica-dacítica.	Existe manifestaciones fumarólicas con alto contenido de sulfatos provenientes de la disolución del H <sub>2</sub> S, el cual es un gas volcánico que indica actividad magmática reciente.
<b>Reservorio</b>	Podría estar alojado en lavas andesíticas a traquiandesíticas fisuradas del miembro inferior del grupo Tacaza (formación Indiviso) debido a que estos materiales presenta condiciones permeables y que de acuerdo a la caracterización hidrogeológica se ha clasificado como acuífero fisurado volcánico.	Existe un reservorio geotérmico profundo evidenciado por manifestaciones con altos contenidos de cloro, boro, arsénico y bajos contenidos de magnesio, cuya geotermometría indica temperaturas entre los 210° y 250°C.
<b>Capa sello</b>	Constituido por niveles tobáceos amarillentos y brechas volcánicas intercalado con areniscas medias a finas y limolitas alteradas de la Fm. Orcopampa. Por sus condiciones poco permeables a impermeables se ha clasificado como acuitardo volcánico sedimentario.	Existe una buena capa sello en el reservorio debido a que las manifestaciones geotérmicas de tipo cloruradas-sódicas están distribuidas en los bordes estructurales del sistema o asociados a fallas profundas.
<b>Zona de ascenso de fluidos (upflow)</b>	Se ubica en el flanco norte del estratovolcán Hualca Hualca, en el sector de Puye Puye, esta zona se encuentra controlada por la intersección de los sistemas de fallas dominantes y se encuentra limitado por el área semicircular de la posible caldera lateral y/o falla Sepina.	Los diagramas ariales de temperatura, cloruros y magnesio indican que la zona más caliente o de ascenso de fluidos se encuentra en el flanco norte del complejo volcánico asociado a la cámara magmática del mismo.
<b>Patrón de circulación de fluidos</b>	En patrón de circulación de fluidos siguen la dirección de los sistemas de fallas NE-SO y NO-SE; controlando las manifestaciones termales de los sectores de Yanque, Pacla y del noreste de Cabanaconde.	El patrón de circulación de fluidos profundos se ponen de evidencia por la distribución de aguas cloruradas de reservorio, manifestadas en superficie lo cual sugiere transporte de fluidos geotérmicos en la dirección noreste y también hacia el noroeste del complejo volcánico.
<b>Zona de recarga</b>	Se encuentra relacionada a las partes altas del complejo volcánico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca. Constituido por los nevados del mismo nombre.	De acuerdo a la información isotópica disponible y su buena correlación con la altura de muestreo, el sistema geotérmico se recarga desde los 4100m hacia la parte alta de los edificios volcánicos.
<b>Zona de descarga (outflow)</b>	Los fluidos subterráneos siguen los patrones estructurales de dirección NE-SO y NO-SE, descargando al norte del sistema, en el Valle del río Colca.	De acuerdo a la geoquímica de las manifestaciones se observan dos zonas de descarga de los fluidos geotérmicos, una de ellas en la zona del Colca Lodge y la de mayor importancia y huella del reservorio en la región de Pacla al noreste y noroeste del reservorio respectivamente.

## **CONCLUSIONES**

- ✓ Las unidades geomorfológicas dominantes en el sistema geotérmico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca (A-S-H), corresponden a zona de cumbres y a vertientes montañosas y colinas empinadas a escarpadas desarrollados en flujos lávicos antiguos, intermedios y recientes afectados por la erosión glacial durante el avance máximo glacial hace 18 ka.
- ✓ Durante los ciclos de sedimentación andina el complejo Majes Colca se comportó como una estructura positiva, lo que permitió yacer en discordancia angular sobre este complejo al grupo Yura. Constituyendo como unidades basales del edificio volcánico andino.
- ✓ Se han definido tres dominios estructurales que controlan el sistema geotérmico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca, de direcciones NE-SO, NO-SE y E-O. Las intersecciones de estos sistemas constituirían el área de mayor permeabilidad, el cual se encuentra limitado por el borde del posible colapso lateral del estratovolcán Hualca Hualca.
- ✓ El análisis espectral de imágenes Landsat, nos permitió sectorizar áreas con alteración hidrotermal de arcillas + óxidos, que se encuentran directamente relacionadas a la zona de mayor permeabilidad.
- ✓ Según la interpretación geológica, estructural e hidrogeológica se ha delimitado el sistema geotérmico Ampato-Sabancaya-Hualca Hualca. Al noreste se encuentra limitado por el sistema de fallas NE-SO, representados por la falla Sepiña. El cual las manifestaciones termales surgentes al noreste de Chivay corresponderían a otro sistema geotérmico.
- ✓ De acuerdo a la caracterización geoquímica de las muestras procesadas, se tienen en el sistema aguas de tipo clorurado sódico, sulfato ácidas, bicarbonatadas y mezclas de ellas, las primeras se logran distinguir en tres principales zonas de importancia las cuales son Pacla, Colca Lodge y Mulhauata, las segundas afloran en la región fumarólica de Pinchollo-Puye Puye, las bicarbonatadas como mezclas se observan distribuidas a lo largo del cañón de Colca y algunos manantiales en las zonas altas del sur.
- ✓ La distinción geoquímica de orígenes de las aguas indica la existencia de una marcada diferencia en el origen de las muestras provenientes del noreste en la zona de Mulahuata asociada a la muestra T-08 ya que estas muestras presentan características geotérmicas y su origen indica un reservorio de mediana temperatura, probablemente asociado a un vulcanismo más antiguo; por su parte las aguas que afloran en la parte más cercana al complejo volcánico presentan correlación en cuanto a su origen ya que provienen de un reservorio geotérmico ubicado en el flanco norte del volcán Hualca Hualca cuya geotermometría catiónica, de sílice y de equilibrio mineral indica que es un reservorio de alta entalpía de 220 y 260°C,
- ✓ Se recomienda realizar estudios geofísicos, para determinar la geometría del reservorio y la profundidad de emplazamiento de la fuente de calor.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Acosta, H., Mamani, M., Alván, A., Oviedo, M. & Rodríguez, J. (2010a). Actividad del Sistema de Fallas Incapuquio durante la formación de la cuenca Arequipa en el Jurásico. XV Congreso Peruano de Geología, Resúmenes extendidos, 4 p.
- Álcala J. (2007). Evolución de los glaciares en el Complejo Volcánico Ampato (Perú). Universidad Complutense de Madrid, España. Tesis de diploma de estudios avanzados, p. 86.
- ANTAYHUA, Y. Y TAVERA, H. (2003) – Volcanes y sismicidad en la región del volcán Sabancaya. Monografía del Instituto Geofísico del Perú, Lima-Perú, 86 p.
- Benavides, V. (1962).- Estratigrafía pre-Terciaria de la región de Arequipa. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú, Tomo 38, p. 5-63.
- Caldas, J. (1993). Geología de los cuadrángulos de Huambo (32r) y Orcopampa (31-r). INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional, N° 46, 62p.
- Cumming, W. (2009,). Geothermal resource conceptual models using surface exploration data. In Proceedings.
- CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. (1996) - Hidrología subterránea. 2a. ed. Barcelona: Omega, 2 t.
- Dávila, D. (1988). Geología del cuadrángulo de Cailloma, hoja 31-s. INGEMMET. Boletín. Serie A: Carta Geológica Nacional, n. 40, 93 p.
- Henley, R., Truesdell, A., Barton, P., Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal System, Reviews in Economic Geology, N.M. Bureau of Mines & Mineral Resources, 1984.
- IGA, I. (2013). Handbook of Geothermal Exploration Best Practices: A Guide to Resource Data Collection. Analysis and Presentation for Geothermal Projects.
- Jacay, J., Bulot, G., Moreno K., Sempere, T. (2006) - Aspectos sedimentológicos del Jurásico-Cretáceo (Grupo Yura) en el área del valle de Majes (Arequipa). Congreso Peruano de Geología, 13, Lima, PE, 17-20 octubre 2006, Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2006, pp. 543-546.
- Jenks, W. (1948).- La geología de la región Arequipa y sus alrededores. Informaciones y Memorias de la Sociedad de Ingenieros del Perú, Vol. 46, N° 9, 104 p.
- KANEOKA, I. & GUEVARA, C. (1984) - K-Ar age determinations of late Tertiary and Quaternary Andean volcanic rocks, southern Peru. *Geochemical Journal*, 18(5): 233-239.
- K. Nicholson, *Geochemistry of Geothermal Fluids: An Introduction*, geothermal Institute, University of Auckland, New Zealand, 1990
- Mamani, M., Rodríguez, R., Acosta, H., Jaimes, F., Navarro, P., Carlotto, V. (2012). Características litológicas y geoquímicas más resaltantes de los arcos magmáticos del Perú desde el Ordovícico. Congreso Peruano de Geología, 16, Lima, PE, 23-26 setiembre 2012, Resúmenes extendidos. Lima: Sociedad Geológica del Perú 2012, 5 p.
- Marini L., *Geochemical Techniques for the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy*, Dipartimento per lo Studio del Territorio e Delle Sue Risorse, Università Degli Studi di Genova, Genova, Italy, Sin Fecha.

Mariño, J. 2010 – Escenarios eruptivos y mapa de peligros del complejo volcánico Ampato-Sabancaya. Université Nice Sophia Antipolis. Ciencias y Gestión de la Tierra, Geología, riesgos y gestión del territorio, 87p.

Mook, W. & Vries, J. (2002) Isotopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones.- Guías y manuales Instituto geológico de España Madrid: IGME 596p.

Muñoz; F. Hickson; C. Cruz; V. Mendoza; M. Cardozo; M. De la Mata; U. & Bona; P. (2012) Desarrollo Geotérmico En Perú: Oportunidades, Conceptos, Acciones, Resultados Y Recomendaciones

NEWELL N. (1949).- Geology of the Lake Titicaca región Perú and Bolivia. Geol. Soc. Amer. Mem. 36 p. Vol. 8 p.p. 111.

OLADE., BID. (1994). guía para estudios de reconocimiento y prefactibilidad geotérmicos.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura –UNESCO & organización Meteorológica Mundial-WMO, (2012), “Glosario Hidrológico Internacional”; N°385: Ginebra 2, Suiza, 471p

Palacios, O., De La Cruz, J., De La Cruz, N., Klinck, B. A., Allison, R. A., Hawkins, M. P. (1993). Geología de la Cordillera Occidental y Altiplano al Oeste del lago Titicaca-Sur del Perú. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico Boletín N° 42, Serie A, Carta Geológica Nacional, 257 p.

Agencia de Cooperación Internacional del Japón (Jica) (2010) Plan Maestro Para el Desarrollo de la Energía Geotérmica En Perú

PRITCHARD, M.; AND SIMONS, M. (2002) - A satellite geodetic survey of large-scale deformation of volcanic centres in the central Andes, Nature, 418, 167– 171.

Sebrier, M.; Mercier, J.; Megard, F.; Laubacher, G.; Carey-Gailhardis, E. (1985) - Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the central Andes of Peru. Tectonics. 7, 895-928.

Torres; L. & Urquizo; M. (2013) Evaluación del estudio de prefactibilidad inicial Proyecto geotérmico de chachimbiro – ecuador, Universidad de El Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Unidad de Postgrado. 109 P.

STRUCKMEIER, W. F. & MARGAT, J. (1995). Hydrogeological maps: a guide and a standard legend. Hannover: International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, 17, 193 p.

Vargas; V & Cruz, V. (2010) – Geothermal Map of Perú, Proceedings World Geothermal Congress, 25-29 April, Bali, Indonesia.

Zhong-He Pang & Mark Reed, Theoretical chemical thermometry on geothermal waters: problems and methods, Institute of Geology, Chinese Academy of Science, Beijing, 1997.