



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA  
EDICION 2016



Evaluación preliminar de datos geológicos y geoquímicos del  
área geotérmica de Tutupaca, Región de Tacna en el sur de  
Perú

PRESENTAN:

Ricardo Humberto Arellano Montañez

Wilfredo Alexander Noé Villalta

ASESOR: Elizabeth Torio

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2016

# CONTENIDO

CONTENIDO .....	2
RESUMEN.....	5
INTRODUCCIÓN.....	6
UBICACIÓN .....	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO .....	7
OBJETIVO GENERAL .....	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
PARTES DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO SEGÚN LA OLADE.....	8
GEOMORFOLOGÍA.....	10
Geoformas de origen volcánico .....	11
Zonas de lavas del Edificio Tutupaca Basal.....	11
Estratocono Tutupaca Noroeste .....	11
Estratocono Tutupaca Noreste .....	11
Domos .....	11
Zona de avalancha de escombros .....	12
Planicie volcanoclástica .....	12
Anfiteatro .....	13
Geoformas de origen glaciar .....	14
Valle Glaciar .....	14
Morrenas .....	14
Circo glaciar.....	15
GEOTECTÓNICA .....	15
ESTRATIGRAFÍA REGIONAL.....	17
Grupo Toquepala .....	17
Formación Chulluncane .....	17
Formación Toquepala.....	18
Formación Tarata .....	18
Formación Huilacollo .....	18
Formación Huaylillas .....	18

Miembro Chubiraca .....	19
Miembro Huanuara .....	19
Formación Sencca .....	19
Grupo Barroso.....	19
Miembro Barroso Inferior .....	19
Miembro Barroso Superior .....	20
Depósitos morrénicos y fluvioglaciares.....	20
Depósitos aluviales .....	20
ESTRATIGRAFÍA LOCAL.....	20
Tutupaca Basal .....	21
Tutupaca Noroeste.....	21
Domos concéntricos .....	21
Secuencias lávicas y piroclásticas del cono de la cumbre .....	22
Depósito de avalancha de escombros “Tacalaya” .....	22
Tutupaca Noreste.....	22
Secuencia Piroclástica Callaza .....	23
Secuencias piroclásticas pre-colapso .....	24
Secuencia piroclástica sin-colapso .....	24
GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL .....	25
Estructuras tectónicas del CVT .....	26
Sistema NE-SO .....	26
Sistema NO-SE .....	26
MANIFESTACIONES HIDROTERMALES .....	27
Características Hidroquímicas.....	27
Clasificación de las aguas termales.....	29
Geotermómetros .....	30
MODELO GEOLÓGICO.....	32
FUENTE DE CALOR.....	32
ZONA DE RECARGA.....	32
RESERVORIO .....	32
CAPA SELLO.....	32

ZONA DE ASCENSO.....	33
RECOMENDACIONES.....	34
REFERENCIAS .....	35

## RESUMEN

El Complejo Volcánico Tutupaca (CVT) se encuentra ubicado en la parte sur de Perú, en la Región de Tacna. Este Complejo Volcánico forma parte de una serie de volcanes formados en la zona durante el Cuaternario, los cuales han despertado un interés por evaluar sus posibles beneficios geotérmicos para Perú. Dentro del volcán Tutupaca se definen 3 sectores en base a sus edades y características geológicas: el edificio Tutupaca Basal que es el más antiguo y está formado por flujos de lava, depósitos de flujos piroclásticos y depósitos de avalanchas de escombros; el edificio Tutupaca Noroeste constituido por secuencias lávicas, domos y un depósito de avalancha de escombros y el edificio Tutupaca Noreste que es el más joven y está constituido por secuencias piroclásticas, domos y avalanchas de escombros. En el CVT se han descrito 2 familias de fallas principales, un sistema NE-SO con menos presencia de fallas y además con fallas de corta extensión y un sistema NO-SE que presenta más cantidad de fallas y fallas con mayor extensión. Hacia el sector sur del CVT se han encontrado varias manifestaciones hidrotermales, observándose un sector con aguas bicarbonatadas (Quebrada Tacalaya) y de bajas temperaturas y otro sector con aguas sulfatadas (Quebradas Azufre Grande y Azufre Chico) y con temperaturas más altas. La zona de aguas cloruradas (origen volcánico) presenta también emanaciones de vapor y se encuentra alineada con fallas del sistema NO-SE. Las características de la zona estudiada permiten inferir que hay un sistema geotérmico con todos sus componentes (reservorio, capa sello, zona de ascenso, zona de recarga y fuente de calor) que merece seguir en evaluación a través de estudios más detallados.

# INTRODUCCIÓN

En el Perú, los volcanes Cuaternarios se ubican en la Cordillera Occidental de los Andes, en dirección NO-SE y forman parte de la Zona Volcánica Central de los Andes (ZVC). En esa zona se ha identificado una serie de volcanes activos, entre los que tenemos al volcán Tutupaca.

En base a los reportes históricos, este volcán habría experimentado varios eventos eruptivos durante los últimos siglos. Por otro lado, los estudios de monitoreo volcánico ponen en evidencia que el Tutupaca presenta una actividad fumarólica persistente. En base a esto, es necesario contar con un estudio integral de este edificio, que incluya la reconstrucción de su evolución vulcanológica y la identificación de sus dinamismos eruptivos.

El presente estudio trata sobre la revisión e interpretación de datos geológicos y geoquímicos con los que se cuenta hasta la actualidad, para realizar una evaluación geológica preliminar del área geotérmica del Volcán Tutupaca, con el fin de identificar el recurso y determinar si es viable continuar con una segunda etapa de exploración más detallada del campo geotérmico.

## UBICACIÓN

El área geotérmica de Tutupaca ( $17^{\circ}01''\text{S}$ ,  $70^{\circ}21''\text{O}$ ) se encuentra ubicado en la parte sur del arco volcánico peruano (ver Figura 1), geográficamente, el Volcán Tutupaca se localiza

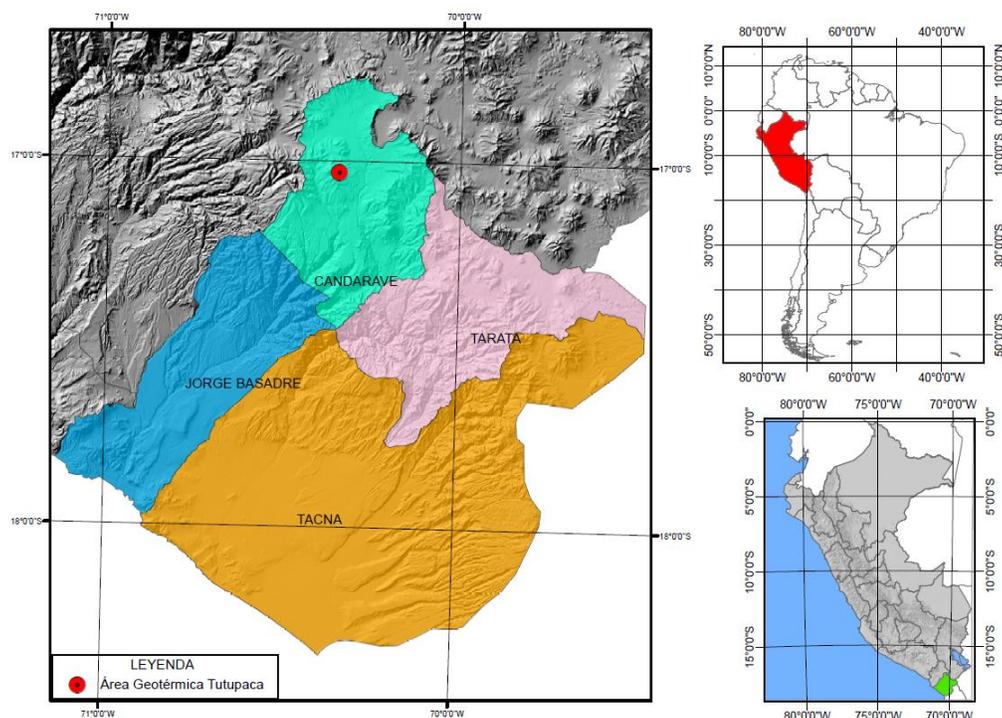


Figura 1 Ubicación del área geotérmica del Volcán Tutupaca

al extremo Norte de la Región Tacna, en el distrito de Candarave, a 28 km del pueblo de Candarave.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Se necesita evaluar, de una manera preliminar, el área geotérmica del Complejo Volcánico Tutupaca, para comenzar con la elaboración de estudios geotérmicos más específicos que definan un posible reservorio geotérmico en la zona.

## **JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

En Perú y específicamente en la Región de Tacna, se están haciendo planes para reforzar el sistema eléctrico, ampliar la cobertura y promover la competencia y el uso sostenible de los recursos. En ese sentido, en la región se cuenta con un potencial geotérmico que podría contribuir a la diversificación de la matriz energética en la zona y el Complejo Volcánico Tutupaca es uno de los 2 principales objetivos de estudio geotérmicos, por lo que determinar su potencial corresponde a una prioridad regional y en muchos sentidos, nacional.

## **OBJETIVO GENERAL**

Realizar una evaluación de datos geológicos y geoquímicos para obtener un modelo geotérmico preliminar de la zona de Tutupaca en el sur de Perú.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilación de información de datos geológicos y geoquímicos del área de estudio.
- Realizar la digitalización y georeferenciación de la información obtenida de la zona de interés.
- Realizar la integración de datos geológicos y geoquímicos.
- Obtener un modelo geotérmico preliminar del área de estudio con base en los datos recopilados.

# PARTES DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO SEGÚN LA OLADE

De acuerdo a la metodología recomendada por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la ejecución de un proyecto geotérmico tipo se divide en dos partes (ver Figura 2): la primera parte, llamada de exploración, es de alto riesgo o incertidumbre y se asocia a la exploración del recurso energético, teniendo como objetivo identificar el yacimiento y la segunda parte, llamada de explotación, es de menor riesgo y está relacionada con el desarrollo y explotación del proyecto (Coronado Triviño & Garciadiego Martínez, 2015).



Figura 2 Etapas de un proyecto geotérmico según la OLADE (Coronado Triviño & Garciadiego Martínez, 2015)

Para desarrollar un proyecto geotérmico en una región geológicamente poco estudiada, es necesario empezar la actividad exploratoria con un estudio de reconocimiento que cubra un área igual o mayor a  $1000\ \text{km}^2$ . Los resultados del estudio inicial permitirán formular las primeras hipótesis sobre las posibilidades geotérmicas de la región, para así poder seleccionar las áreas favorables para estudios de prefactibilidad como una segunda etapa del proyecto (Coronado Triviño & Garciadiego Martínez, 2015). En la etapa de prefactibilidad, el objetivo es definir con mayor detalle las características litológicas, vulcanológicas y estructurales del área (Organización Latinoamericana de Energía, 1994), trabajando con un área entre  $400$  y  $500\ \text{km}^2$ .

De acuerdo a la OLADE, un estudio de reconocimiento consiste en la evaluación preliminar de los recursos geotérmicos con fines de generación eléctrica o en otros usos en una región determinada, delimitando las áreas de mayor interés para así plantear las líneas de acción a seguir en la etapa de prefactibilidad (Organización Latinoamericana de Energía, 1994). Durante la fase de reconocimiento la geología es el eje fundamental de estudio, ya que a partir de la interpretación geológica se establecen las áreas más promisorias en donde se llevarán a cabo estudios de exploración geofísica y geoquímica, esto debido a que en la fase de reconocimiento, por lo general los recursos económicos no permiten desarrollar estudios geofísicos por su alto costo (Organización Latinoamericana de Energía, 1994).

Los objetivos principales de un estudio de reconocimiento, según la OLADE, son:

- Evaluar preliminarmente las posibilidades geotérmicas a nivel nacional o regional.
- Identificar las áreas de interés geotérmico.
- Definir un esquema geotérmico preliminar de cada área identificada y seleccionar las áreas de interés para la ejecución de estudios de prefactibilidad.
- Elaborar un programa de exploración detallado o de prefactibilidad para áreas de interés geotérmico.
- Reunir información técnica que junto con consideraciones socio-económicas y políticas constituyan las bases para toma de decisiones

Un estudio de reconocimiento se divide en cuatro fases (ver Figura 3): la primera es la recopilación y organización de toda la información preexistente; la segunda etapa es la evaluación de la información encontrada y la organización y ejecución de un programa de trabajo de campo y de laboratorio; la tercera etapa consiste en la interpretación e integración de todos los estudios realizados, logrando definir un área de interés y una estimación preliminar del potencial energético y la última etapa consiste en la elaboración de un programa de actividades para realizar los estudios de prefactibilidad.



Figura 3 Fases de un estudio de reconocimiento (Organización Latinoamericana de Energía, 1994)

## GEOMORFOLOGÍA

En el Complejo Volcánico Tutupaca (CVT) se han identificado geofomas de origen volcánico y de origen glaciar, entre las cuales tenemos:

## **GEOFORMAS DE ORIGEN VOLCÁNICO**

Se han identificado diversas formas de origen volcánico entre las que se pueden citar estratoconos volcánicos, domos, colinas aisladas y como principal estructura tenemos un anfiteatro (ver Figura 4).

### **Zonas de lavas del Edificio Tutupaca Basal**

Se ha definido una zona de flujos de lava de baja pendiente ( $<15^\circ$ ) que está parcialmente afectada por erosión glaciaria y en algunas zonas cubierta por morrenas. Hacia el noreste del Complejo Volcánico Tutupaca estas secuencias de lavas están bastante hidrotermalizadas y afectadas por erosión glaciaria, hacia el noroeste se encuentran secuencias lávicas subhorizontales que en superficie muestran frentes de flujos de lavas, hacia el sur las pendientes son menos abruptas y presentan una morfología más ondulada, debido a la presencia de morrenas que se encuentran cubriendo las secuencias lávicas, las cuales presentan estrías de erosión glaciaria.

### **Estratocono Tutupaca Noroeste**

Este sobreyace al edificio Tutupaca Basal y posee una forma ligeramente cónica con un diámetro aproximado de 3 km, se emplaza entre los 4880 y 5790 msnm. Su flanco occidental está cubierto por morrenas y la base está conformada por domos dispuestos en forma casi concéntrica. Sobreyaciendo a los domos, se emplaza el cono superior de un diámetro de 1 km, el cual está constituido por una secuencia de lavas y piroclastos, los cuales están afectados por la erosión glaciaria, que originaron circos glaciares.

### **Estratocono Tutupaca Noreste**

Se encuentra sobreyaciendo a los edificios Tutupaca Basal y Tutupaca Noroeste, el grado de erosión es mucho menor que los anteriores estratoconos y presenta un anfiteatro debido al colapso de uno de los flancos. Este estratocono se caracteriza por presentar 7 domos yuxtapuestos.

### **Domos**

Presentan una forma aproximadamente circular, formados por la alta viscosidad del magma que no permite que fluya demasiado lejos de su centro de emisión. En el área de estudio se han identificado domos en los edificios Tutupaca Basal, Tutupaca Noroeste y en el Tutupaca Noreste.

#### ***Domos alineados del Edificio Tutupaca Basal***

Al sureste del edificio Tutupaca Basal se han identificado 13 domos de pequeño tamaño (100-750 m de diámetro). Los domos más pequeños tienen menos de 20 m de altura, mientras que los más grandes tienen entre 50-70 m de altura. Estos domos cortan las lavas del edificio Tutupaca Basal y presentan formas subredondeadas y alargadas y están

alineados en dirección NO-SE. Hay un domo que se encuentra al noroeste del edificio Tutupaca Basal, pero se ubica siguiendo la misma dirección que los otros domos, presenta una forma subredondeada y tiene 300 m diámetro.

### ***Domos del Estratocono Tutupaca Noroeste***

Este es un conjunto de domos concéntricos en la base del estratocono, los cuales presentan formas subredondeadas, con diámetros entre 350 y 500 m. Presentan una fuerte pendiente y se encuentran erosionados por la actividad glaciaria presente en este edificio.

### ***Domos del Estratocono Tutupaca Noreste***

Este edificio está constituido por 7 domos yuxtapuestos y por domos coladas, los cuales presentan formas subredondeadas, alargadas y algunos no tienen formas definidas. Estos domos presentan fuertes pendientes y llegan a alcanzar hasta 1,400 m de diámetro y 1 km de alto.

### ***Domo Banco***

Ubicado hacia el norte del complejo volcánico Tutupaca, su base se encuentra sobre los 4970 msnm y su cima sobre los 5300 msnm. Presenta una forma ovalada, alargada, con un eje mayor de  $\pm 2$  km de diámetro. Presenta pendientes abruptas y está disectado por la Falla Banco.

## **Zona de avalancha de escombros**

Aflora hacia el noreste del Complejo Volcánico Tutupaca, en la planada Paipatja, hacia el este en la quebrada Zuripujo y la quebrada Azufre Grande y hacia el Oeste en la quebrada Tutupaca. Los depósitos cubren un área de 17 km<sup>2</sup>, alcanzando distancias máximas de 5.5 km hacia el noreste en la quebrada Paipatja, 6 km hacia el este en la quebrada Zuripujo, 3 km en la quebrada Azufre Grande y 2 km en la quebrada Tutupaca.

En la fuente de colapso del edificio Tutupaca Noreste se puede observar la presencia de una colina de 600-700 m de diámetro, con aproximadamente 20 m de altura y con superficies de poca pendiente (7°-17°).

En la zona media y distal de los depósitos de las quebradas Paipatja, Zuripujo y Azufre Grande se observan varias decenas de colinas o "hummocks", las cuales presentan flancos de baja a mediana pendiente (5° - 25°), con diámetros de 70 a 500 m.

Otra característica importante de esta unidad geomorfológica y que también se observa en la zona media son las lineaciones o estrías, las cuales se pueden observar claramente en las fotografías aéreas e indican las diferentes direcciones que tomó la avalancha de escombros durante su emplazamiento.

## **Planicie volcanoclástica**

Se extiende hacia el este del Complejo Volcánico Tutupaca, desde los 4500 msnm a los 4600 msnm. Se caracteriza por presentar extensas planicies, de topografía horizontal y ligeramente ondulada. En las depresiones se han canalizado algunos depósitos

piroclásticos del edificio Tutupaca Noreste, así mismo, en el río Callazas se ha formado un pequeño valle. Hacia el noreste del Complejo Volcánico Tutupaca, a 5.5 km de la fuente, en la Pampa Paipatja, se observa la presencia de estrías, dándole la apariencia de un abanico el cual tiene una forma triangular.

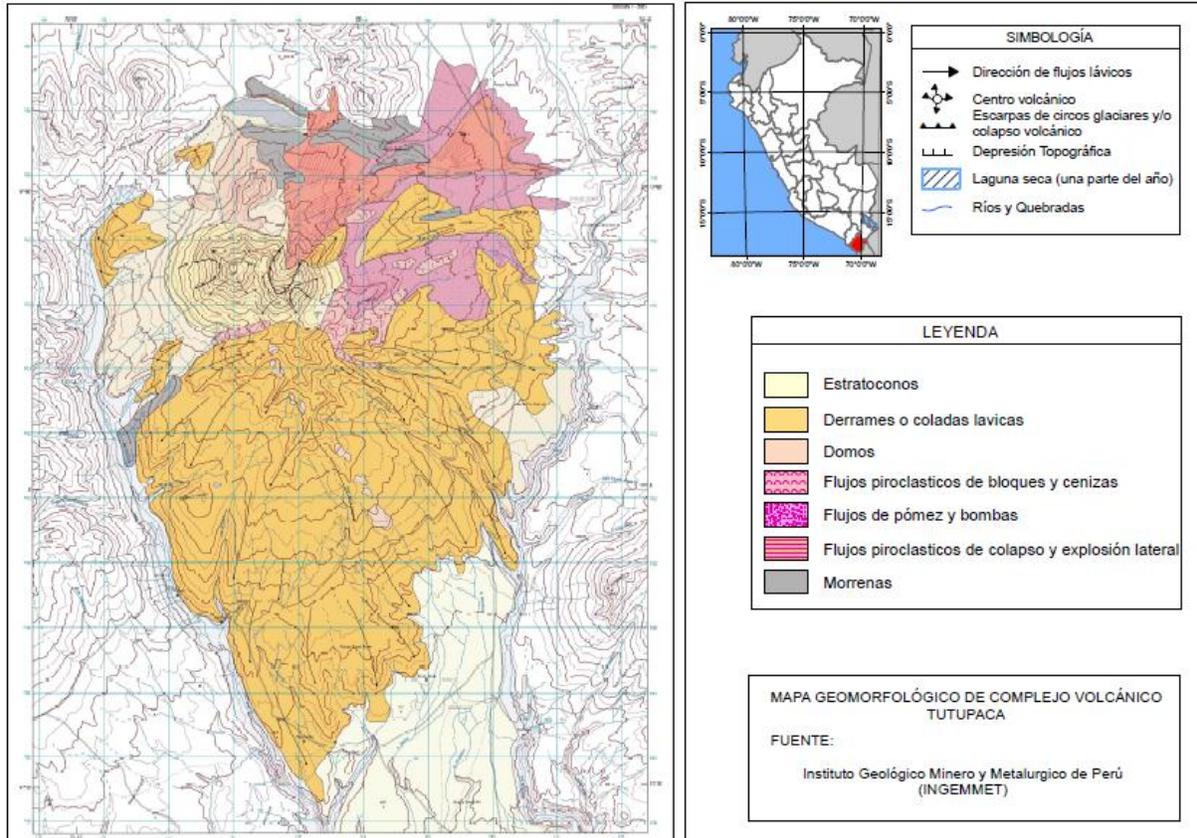


Figura 4 Mapa geomorfológico del Complejo Volcánico Tutupaca (Fidel & Zavala, 2001)

## Anfiteatro

Un anfiteatro es una estructura volcánica en forma de herradura, que generalmente está asociado con un colapso sectorial. La profundidad, ancho y altura de un anfiteatro es variable. El anfiteatro del Complejo Volcánico Tutupaca está ubicado en el edificio Tutupaca Noreste, tiene forma de herradura, presenta un diámetro de 1 km, una altura de 900 m aproximadamente y está abierto hacia el noreste.

Las fallas del domo Banco atraviesan este anfiteatro. Entre los edificios Tutupaca Noreste y Tutupaca Noroeste se ha identificado una cicatriz de colapso que puede indicar un segundo colapso sectorial. Esta estructura de colapso, ha sido rellenada por el crecimiento de domos y presenta forma de una semi-herradura con 500 m de diámetro, no se distingue la altura debido a la presencia de los domos, está abierta hacia el este o sureste del edificio Tutupaca Noreste y afecta a los domos recientes.

## **GEOFORMAS DE ORIGEN GLACIAR**

Dentro del área de estudio afloran depósitos y unidades litológicas afectadas por la actividad glaciaria registrada durante el Pleistoceno superior, afectando principalmente a los edificios Tutupaca Basal y Tutupaca Noroeste. El edificio Tutupaca Noreste no ha sido afectado por la actividad glaciaria. Actualmente el área presenta poca actividad glaciaria y solo se encuentra una cobertura de nieve delgada durante el invierno. Entre las geofformas de origen glaciario tenemos:

### **Valle Glaciario**

En la zona de estudio se han identificado varios valles glaciares. Hacia el oeste en el sector Tacalaya, se observa un valle que está localizado entre 4500 a 5000 msnm, posee 5 km de longitud y 380 m de ancho aproximadamente y presenta una morfología cóncava. Hacia el Suroeste del CVT, entre 4700 y 4900 msnm, en la quebrada Vilacota se observa un valle glaciario que presenta 2 km de largo y 600 m de ancho, en los bordes presenta secuencias de flujos de lava casi verticales. En la quebrada Quilcata el valle glaciario posee 2 km de longitud y 800 m de ancho, presenta una morfología cóncava y muestra bajas pendientes (5° a 6°). En la Pampa Turun Turun se ha identificado un valle que tiene 4 km de longitud y presenta un ancho de aproximadamente 2.5 km con una morfología cóncava con bajas pendientes (aproximadamente 5°), en los bordes de este valle se observan grandes morrenas.

### **Morrenas**

Las morrenas son consideradas como geofformas de acumulación, las cuales se ubican en las faldas del Complejo Volcánico Tutupaca. En el área de estudio se han identificado 2 generaciones de morrenas:

#### ***Morrena antigua***

En el edificio Tutupaca Basal se presentan las morrenas más antiguas, las cuales tienen formas onduladas y suavizadas, ocupan grandes extensiones y son generalmente morrenas laterales y frontales. En esta zona se han registrado morrenas, umbrales rocosos modelados por las masas de hielo y estrías en las rocas. La cota mínima a la que se encuentran es 4300 msnm y la cota máxima es 4800 msnm.

#### ***Morrena reciente***

Estas morrenas se encuentran en el flanco occidental del edificio Tutupaca Noroeste. Se observan morrenas frontales y laterales, las cuales se encuentran entre los 4950 y 5300 msnm, tienen de 300 a 900 m de largo y presentan entre 10 a 40 m de espesor. Se caracterizan por que no están suavizadas como las anteriores, probablemente se formaron durante los últimos 5 ka (Neo-glaciario).

## **Circo glaciar**

Se ha identificado 1 circo glaciar ubicado en la ladera oeste del edificio Tutupaca Noroeste, el cual presenta una forma semicircular cóncava.

# **GEOTECTÓNICA**

En el marco geotectónico general, se sabe que la Cordillera de los Andes es parte integrante del ciclo alpino mundial que se ha formado en el límite entre la placa oceánica pacífica y la placa suramericana. Los andes peruanos comprenden un conjunto de cordilleras emplazadas entre la fosa peruano-chilena y el llano amazónico. Toda la estratigrafía, estructuras, magmatismo, mineralización y sismicidad de la Cordillera de los Andes y del territorio peruano son directa o indirectamente el resultado de la subducción de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Suramericana, a lo que se denomina “Subducción Andina” y que se tipifica como una cordillera perioceánica característica.

El desarrollo de la cordillera se inicia en el Paleozoico Superior, continúa en el Mesozoico y adquiere su forma definitiva en el Cenozoico (Terciario), prolongándose hasta la actualidad.

Actualmente, el régimen de esfuerzos dominante en la zona del CVT es extensivo y tiene una dirección principal con azimuth entre 12 y 25° (ver Figura 5), produciendo fallas normales con componente dextral o sinistral, dependiendo del rumbo de la falla y de su forma de acomodamiento al régimen de esfuerzos (Benavente, Carlotto, & del Castillo, 2010). Se estima que la tasa de subducción actual es de 63 a 79 cm/año y tiene un ángulo de convergencia con un azimuth de 79° (Manrique Llerena, 2013).

El inicio de la subducción andina se produce en el Paleozoico Superior (Pérmico), durante la fase tectónica tardihercínica. Esta fase se ha reconocido en muchas cordilleras y se considera como la responsable del inicio de la deriva continental, reajuste y ordenamiento de las placas de la tierra. Se caracteriza por la deformación originada por fracturas asociadas a grandes fallas del tipo de desgarre, inversas y transformantes, muchas de las cuales limitan las placas tectónicas.

En la evolución moderna de los Andes se evidencian principalmente abundantes fallas recientes, pliegues, levantamientos, el vulcanismo cuaternario y abundante actividad sísmica. Entre estas primeras deformaciones se emplaza la cuenca peruana que evoluciona posteriormente al denominado “Geosinclinal Andino”.

En esta época, en la zona de subducción se generan abundantes fracturas en el basamento Precambriano-Paleozoico a lo largo del eje de la cuenca, las mismas que conectan al manto superior con la cuenca peruana, permitiendo que la sedimentación marina sea constantemente interrumpida por derrames volcánicos submarinos y, fuera de ella, que la sedimentación se realice sin interrupciones magmáticas.

Por efectos de la fase tectónica intracretácea, la cuenca peruana inicia su epirogénesis, se pliega y se emplazan los gabros de las primeras pulsaciones magmáticas del Batolito de la Costa datados entre 105 y 102 Ma.

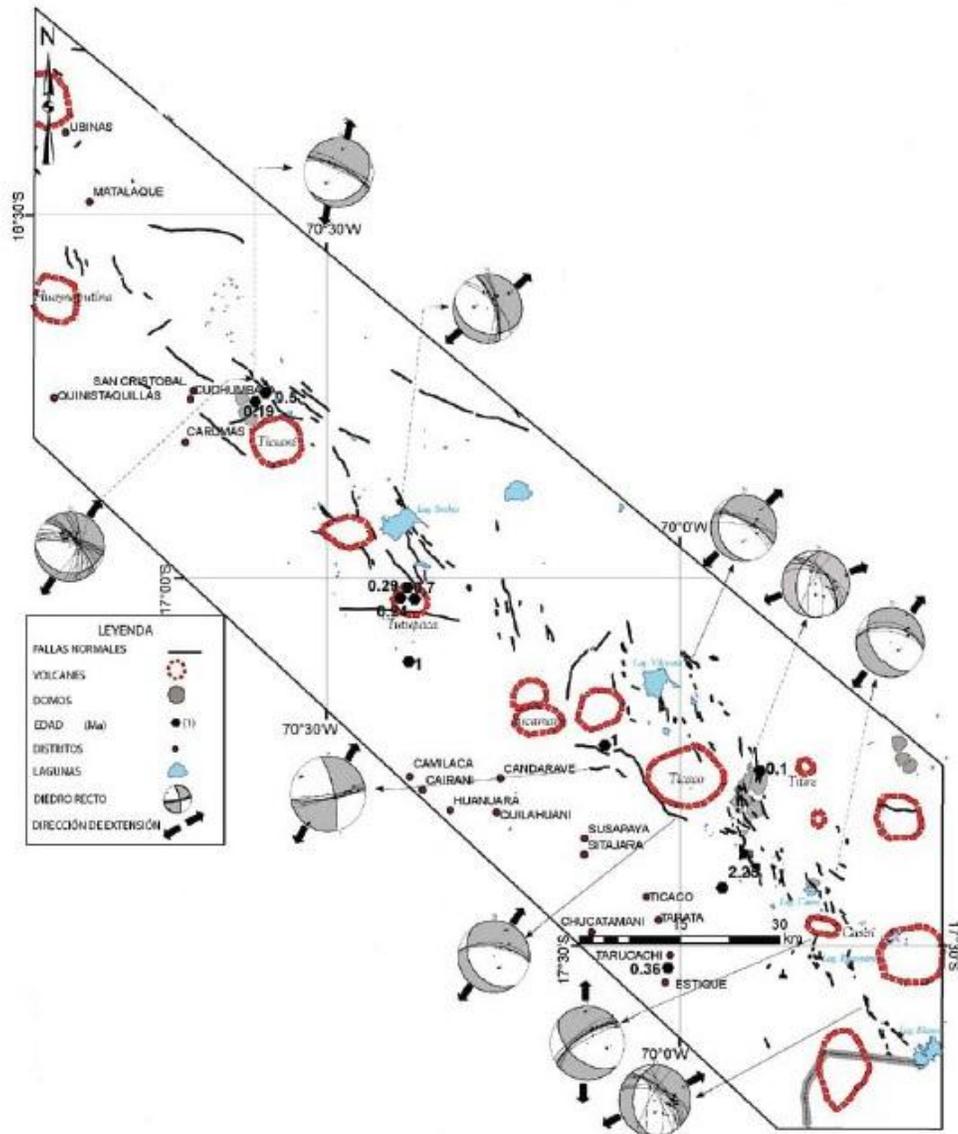


Figura 5 Mapa estructural del arco volcánico activo del sur de Perú (Benavente, Carlotto, & del Castillo, 2010)

Durante la fase tectónica del Cretácico Superior-Terciario Inferior se acentúa el plegamiento y epirogénesis andina. Simultáneamente, a lo largo de la zona del geosinclinal andino, se emplazan al oeste los demás complejos intrusivos del Batolito de la Costa en varios pulsos magmáticos que se producen entre 102 y 53 Ma, el vulcanismo continental de los Grupos Toquepala y Calipuy en el sur y norte del Perú respectivamente.

Es importante destacar que el magmatismo Mesozoico y Cenozoico está relacionado a la migración oeste a este del eje activo de la Cordillera de los Andes, por efectos de la subducción, observándose vulcanismo submarino de edad Jurásico-Cretácico Inferior cerca de la fosa Peruano-Chilena, representado en el sur por las Formaciones Chocolate y Río Grande, en el área de Lima por los volcánicos Santa Rosa, Puente Inga, Ancón, Ventanilla y Cerro Blanco y al Norte del Perú los volcánicos Oyotún. Más al este se emplaza el Batolito de la Costa durante el Cretáceo Superior-Terciario Inferior con nítida migración de los pulsos magmáticos; continuando al este.

Continúan el Batolito de Huaraz de edad miocénica y sus equivalentes volcánicos miopliocenos del sur y norte del país, emplazándose a lo largo de todo el eje de la Cordillera Occidental y finalmente en el extremo sur peruano se emplaza el vulcanismo continental reciente de la franja volcánica de Andahua, indicándonos la última migración del eje de actividad magmática.

Durante la fase tectónica del Mioceno-Plioceno, la Cordillera de los Andes queda definitivamente formada.

## **ESTRATIGRAFÍA REGIONAL**

En la zona del Complejo Volcánico Tutupaca se han identificado rocas volcánicas, depósitos morrénicos, aluviales y coluviales. Las rocas más antiguas corresponden a productos volcánicos del Cretácico Superior al Eoceno. Posteriormente se emplazaron depósitos ignimbríticos durante el Mioceno al Plioceno. Suprayaciendo a estas formaciones se han identificado depósitos morrénicos, fluvioglaciares, aluviales y coluviales del Cuaternario (Manrique Llerena, 2013).

### **GRUPO TOQUEPALA**

Este grupo está constituido por las formaciones Chulluncane, Toquepala, Tarata y Huilacollo. En general se considera que es un conjunto de rocas volcánicas intercaladas con sedimentos gruesos. Las formaciones mencionadas están afectadas por rocas intrusivas, por lo que presentan distintos grados de metamorfismo (Jaén La Torre, 1965)

Las dataciones para este grupo han arrojado edades entre 45 y 72 Ma, por lo cual se considera que está comprendido entre el Cretácico Superior al Eoceno (Manrique Llerena, 2013).

### **Formación Chulluncane**

Está constituida por conglomerados polimícticos medianos y gruesos, de colores gris oscuro y marrón rojizo, bien compactados. Sus componentes principales son rodados de cuarcita, lutita, andesita y escasas proporciones de caliza, englobados en una matriz arenotobácea. El tamaño de los clastos varía entre 2 y 30 cm de diámetro, aunque excepcionalmente se pueden encontrar cantos de cuarcita de hasta 1 m de diámetro. Entre

los conglomerados se pueden encontrar niveles de areniscas tobáceas gris oscuras y algunos niveles de andesitas (Jaén La Torre, 1965).

## **Formación Toquepala**

Está compuesta por lavas y piroclásticos andesíticos, dacíticos y riolíticos, con algunas intercalaciones lenticulares de rocas sedimentarias. El espesor total de esta formación se estima en unos 1830 m (Jaén La Torre, 1965).

## **Formación Tarata**

Esta formación está compuesta en su parte inferior por una sucesión de conglomerados, areniscas y calizas intercaladas con lutitas. El conglomerado es gris verdoso y está compuesto de guijarros subredondeados de andesita; las areniscas son arcósicas y se intercalan con capas de lutitas y calizas; las calizas se encuentran bien estratificadas y se destacan dentro del conjunto por su dureza (Jaén La Torre, 1965).

La parte superior es mayormente volcánica, compuesta principalmente por brechas, tobas andesíticas y dacíticas y hacia el tope una secuencia de andesitas porfíricas con horizontes de brechas (Jaén La Torre, 1965).

## **Formación Huilacollo**

Esta formación consiste principalmente en una secuencia de lavas y piroclastos. Las secuencias de lavas tienen composición andesítica, son de color verde, violáceo o gris y se encuentran dispuestos en bancos medianos a gruesos y se intercalan con brechas andesíticas y tobas dacíticas a riolíticas (Jaén La Torre, 1965).

## **FORMACIÓN HUAYLILLAS**

La formación Huaylillas ha sido descrita como una secuencia de ignimbritas dacíticas a riolíticas con edad comprendida entre 12 y 24 Ma (Mioceno Inferior a Mioceno Superior), las cuales afloran en las regiones de Tacna y Moquegua, prolongándose hasta el territorio chileno (Manrique Llerena, 2013).

Esta formación aflora al sur, al este y al oeste del CVT. La formación Huaylillas se encuentra bien conservada en la zona, por ser de alta resistencia y por haber poca erosión. Se han realizado varias dataciones en la zona, 30 km al sureste del CVT ha sido datado por el método K/Ar en  $21,6 \pm 0,7$  Ma y 35 km al oeste del CVT también se ha datado por el método K/Ar en  $14,2 \pm 0,2$  Ma y  $18,9 \pm 0,3$  (Manrique Llerena, 2013).

Esta formación se divide en 2 miembros:

## **Miembro Chubiraca**

Comprende la parte más baja de la Formación Huaylillas y está constituido por una secuencia de tobas medianamente compactadas con abundante contenido de bloques gruesos distribuidos irregularmente. Las tobas son de color gris oscuro a blanquecinas y comprenden alrededor del 60% de la roca, mientras que los bloques son principalmente de obsidiana, andesita y basalto y tienen dimensiones centimétricas y hasta de 1 m (Jaén La Torre, 1965).

## **Miembro Huanuara**

Este miembro está compuesto por tobas, lavas y brechas riolíticas a dacíticas, de color rosado blanquecino y pardo rojizo (Jaén La Torre, 1965).

## **FORMACIÓN SENCÇA**

Esta formación está constituida por depósitos ignimbríticos de composición riolítica, de colores blanco a grisáceo, aunque hacia la parte inferior se encuentran algunas ignimbritas de color rojizo. Se considera que esta formación es el sustrato de los estratovolcanes pleistocénicos de la zona. La Formación Sencça ha sido dividida en 2 niveles, uno inferior de ignimbritas color salmón ligeramente soldadas y con un espesor entre 40 y 50 m y un nivel superior de ignimbritas de color gris, no estratificadas y con un espesor entre 40 y 50 m (Manrique Llerena, 2013).

Esta formación ha sido datada al sur del CVT, obteniendo edades de  $6 \pm 0.3$  Ma y de  $4.8 \pm 0.5$  Ma (Manrique Llerena, 2013).

## **GRUPO BARROSO**

Se le denomina así al conjunto de rocas volcánicas que forman la Cordillera del Barroso, ubicada en la zona andina de la región de Tacna. Estas rocas fueron emplazadas en el periodo entre el Mioceno Superior y el Pleistoceno. Este grupo se divide en 2 miembros:

### **Miembro Barroso Inferior**

Este miembro está constituido predominantemente por lavas andesíticas de textura porfídica y colores gris oscuro, azulado o marrón rojizo. En general, la roca es dura y compacta y sus manteamientos forman flancos de conos volcánicos. Otra característica de estas rocas es la presencia de vacuolas o amígdalas de calcita con diámetros variables entre 2 y 4 mm (Jaén La Torre, 1965). Este miembro se desarrolló entre el Mioceno Superior y el Plioceno Inferior y, con algunas variaciones texturales, constituye la estructura central de varios estratovolcanes muy erosionados e hidrotermalizados. Los principales estratovolcanes de este miembro son el Yanhuato, Hualto, Ananto, etc. (Manrique Llerena, 2013)

## **Miembro Barroso Superior**

Este miembro se compone principalmente de lavas de composición traquiandesítica y traquítica, de colores gris oscuro y de textura porfídica. A menudo se observan intercalaciones de brechas y tobas de colores blanquecinos y marrones. Generalmente, las rocas de este miembro se encuentran en la periferia de estructuras volcánicas, en capas con poca pendiente (Jaén La Torre, 1965).

En áreas cercanas al CVT se han identificado estratovolcanes y depósitos de flujos piroclásticos correspondientes al Grupo Barroso, por ejemplo, 20 km al norte se ha identificado el estratovolcán Yuncane datado en  $6.43 \pm 0.2$  Ma. Hacia el SE, a 13.5 km del CVT afloran secuencias de lava del estrato volcán Nazaparco, de composición andesítica, hidrotermalizadas y erosionadas, datadas en  $5.6 \pm 0.2$  Ma (Manrique Llerena, 2013)

## **DEPÓSITOS MORRÉNICOS Y FLUVIOGLACIARES**

Los depósitos morrénicos se encuentran bien conservados, ocupando los flancos de los edificios volcánicos y las cabeceras y laderas de valles glaciares, mientras que el material fluvioglacial generalmente se encuentra rellenando las depresiones intermontañas. Las morrenas se componen principalmente de fragmentos gruesos y angulosos mezclados con una masa areno-arcillosa. Los depósitos fluvioglaciares se componen de conglomerados y gravas de rocas volcánicas que se intercalan con arenas y arcillas, presentando una estratificación en bancos gruesos (Manrique Llerena, 2013).

Las morrenas del último avance glacial (21-18 mil años) corresponden a morrenas frontales y laterales situadas al N, S, SO y SE del CVT. Las morrenas más recientes se encuentran por encima de los 4950 msnm y corresponden a reavances de los glaciares entre 14 y 5 mil años (Manrique Llerena, 2013).

## **DEPÓSITOS ALUVIALES**

En diversos sectores los ríos han cortado sobre sus propios depósitos formando terrazas de variado espesor y amplitud. El material de estas terrazas se compone de cantos gruesos, gravas, arenas y arcillas, estratificadas en capas lenticulares y con inclusiones suaves en el sentido de la corriente. Los ríos tributarios al desembocar en los valles principales han constituido pequeños conos de eyección cuyas dimensiones varían de acuerdo a la importancia de dichos tributarios (Manrique Llerena, 2013).

## **ESTRATIGRAFÍA LOCAL**

El Complejo Volcánico Tutupaca se puede dividir en 3 edificios volcánicos: el Tutupaca Basal, muy erosionado y 2 conos gemelos pero con distinto grado de erosión, el Tutupaca Noroeste y el Tutupaca Noreste (Samaniego, Mariño, & Manrique, 2012).

## **TUTUPACA BASAL**

Este edificio constituye la parte más antigua del CVT. Se trata de un edificio bastante erosionado, constituido por flujos de lava, depósitos de flujos piroclásticos y depósitos de avalanchas de escombros (ver Figura 6 y 7). La parte central del edificio muestra una estructura compleja constituida por varios picos, los cuales a su vez están constituidos por secuencias de lavas afectadas por la erosión glacial y que se encuentran fuertemente hidrotermalizadas. Las lavas de este edificio son andesitas porfíricas de color gris oscuro, que contienen fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbol y piroxeno. Al sur de este edificio, se han identificado una serie de pequeñas colinas de 250-750 m de diámetro, alineadas en dirección NNO-SSE, constituidos por traquitas con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, los cuales están englobados en una matriz microcristalina. Estos domos han sido datados en  $0.26 \pm 0.2$  Ma. Adicionalmente, se han observado dos depósitos de avalanchas de escombros asociados con este edificio. El primero se encuentra ubicado en el flanco O del edificio, hacia el valle del río Tacalaya, el cual posee espesores mínimos de 100 a 150 m y presenta una facie de bloques y una de matriz. Normalmente los bloques poseen dimensiones centimétricas a decimétricas, tienen soporte de matriz y son angulosos. El depósito posee una litología heterogénea, conformado por lavas de color gris, gris oscuro, amarillo ocre y rojizo. El segundo depósito de avalancha de escombros está ubicado al E del edificio y aflora en el valle de la Quebrada Zuripujo. Este depósito se caracteriza por presentar abundante material hidrotermalizado y se encuentra cubierto parcialmente por secuencias piroclásticas más jóvenes asociadas con el edificio Tutupaca Noreste. Esta avalancha estaría asociada con un colapso sectorial del edificio Tutupaca Basal (Samaniego, Mariño, & Manrique, 2012).

## **TUTUPACA NOROESTE**

Este edificio posee forma ligeramente cónica y se encuentra parcialmente erosionado por la actividad glacial (ver Figura 6 y 7). Posee un diámetro aproximado de 3 km, su base se encuentra a 4880 msnm y su cima alcanza los 5790 msnm (Samaniego, Mariño, & Manrique, 2012). Este edificio suprayace al Edificio Basal y está conformado por secuencias lávicas, domos y un depósito de avalancha de escombros.

### **Domos concéntricos**

Esté cono está conformado por domos concéntricos en la parte inferior, los cuales presentan un diámetro entre 1-1.5 km y una altura de 400 a 500 m. Los domos están compuestos de dacitas con textura porfírica, que incluye fenocristales de plagioclasa, anfíbol, esfena, biotita, óxidos de Fe-Ti y trazas de cuarzo. Se han identificado enclaves magmáticos microcristalinos de color gris oscuro constituidos por fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita (Manrique Llerena, 2013).

## **Secuencias lávicas y piroclásticas del cono de la cumbre**

Suprayaciendo a los domos se han identificado secuencias lávicas que muestran estratificación métrica y que alcanzan más de 200 m de espesor y constituyen la parte superior del cono. Estas secuencias están ampliamente afectadas por la erosión glacial (Manrique Llerena, 2013).

## **Depósito de avalancha de escombros “Tacalaya”**

A este edificio se asocia un depósito de avalancha de escombros, el cual se encuentra ubicado en el flanco oeste del edificio, posee espesores mínimos de 100 a 150 m y presenta una facies de bloques y una de matriz. Este depósito se encuentra cubierto por morrenas antiguas, de modo que presenta una superficie ondulada y erosionada. Normalmente los bloques poseen dimensiones centimétricas a decimétricas y son angulosos. El depósito posee una litología heterogénea, conformado por lavas de color gris, gris oscuro, amarillo ocre y rojizo (Manrique Llerena, 2013).

## **TUTUPACA NORESTE**

En base a su morfología y al grado de erosión, se considera que este edificio es el más joven del complejo. Posee un diámetro aproximado de 2 km, su base se encuentra a 4900 msnm y su cima alcanza los 5790 msnm (ver Figura 6 y 7). Este edificio está constituido por al menos 6 domos que se caracterizan por su morfología abrupta y que están exceptos de erosión glacial, lo cual sugiere una edad Holocénica. Los domos están constituidos por andesitas porfíricas con grandes fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita en una matriz parcialmente vesiculada que varía entre microcristalina a vítrea. En la parte superior de este edificio se ha identificado una escarpa en forma de herradura de 1 km de diámetro y que está abierta hacia el NE. Los depósitos de este evento de colapso se encuentran al pie del anfiteatro y se extienden hasta la pampa Taipicirca, en donde se encuentran cubiertos por secuencias piroclásticas más jóvenes. En la parte proximal, los depósitos de esta avalancha de escombros comprenden una facies de bloques caracterizada básicamente por dos tipos petrográficos: bloques altamente fracturados de lavas andesíticas altamente hidrotermalizadas, de colores amarillo-verdosos y andesitas/dacitas grises, parcialmente alteradas con texturas vesiculadas propias de domos (Samaniego, Mariño, & Manrique, 2012).

## Secuencia Piroclástica Callaza

En el valle del río Callaza, se ha identificado un depósito de flujo piroclástico de pómez y ceniza, que aflora entre 7 y 10 km al este del volcán. El depósito presenta una coloración gris clara a beige, con espesores mínimos de 10 a 15 m. Este depósito está constituido por bombas de pómez con un tamaño menor a 30 cm, constituido por una pómez gris blanquecina, poco vesiculada que contiene plagioclasa, anfíbol y en menor proporción biotita. Se observan adicionalmente bombas de pómez con un marcado bandeamiento composicional (< 5%) que sugieren un mecanismo de mezcla de magmas entre un polo dacítico y uno andesítico. Finalmente, se observan líticos (<5-10%) andesíticos densos de color gris, líticos con textura vítrea y color gris oscuro y pocos líticos hidrotermalizados. En base a la envergadura de este depósito se considera que representa una etapa explosiva importante en el desarrollo del volcán Tutupaca.

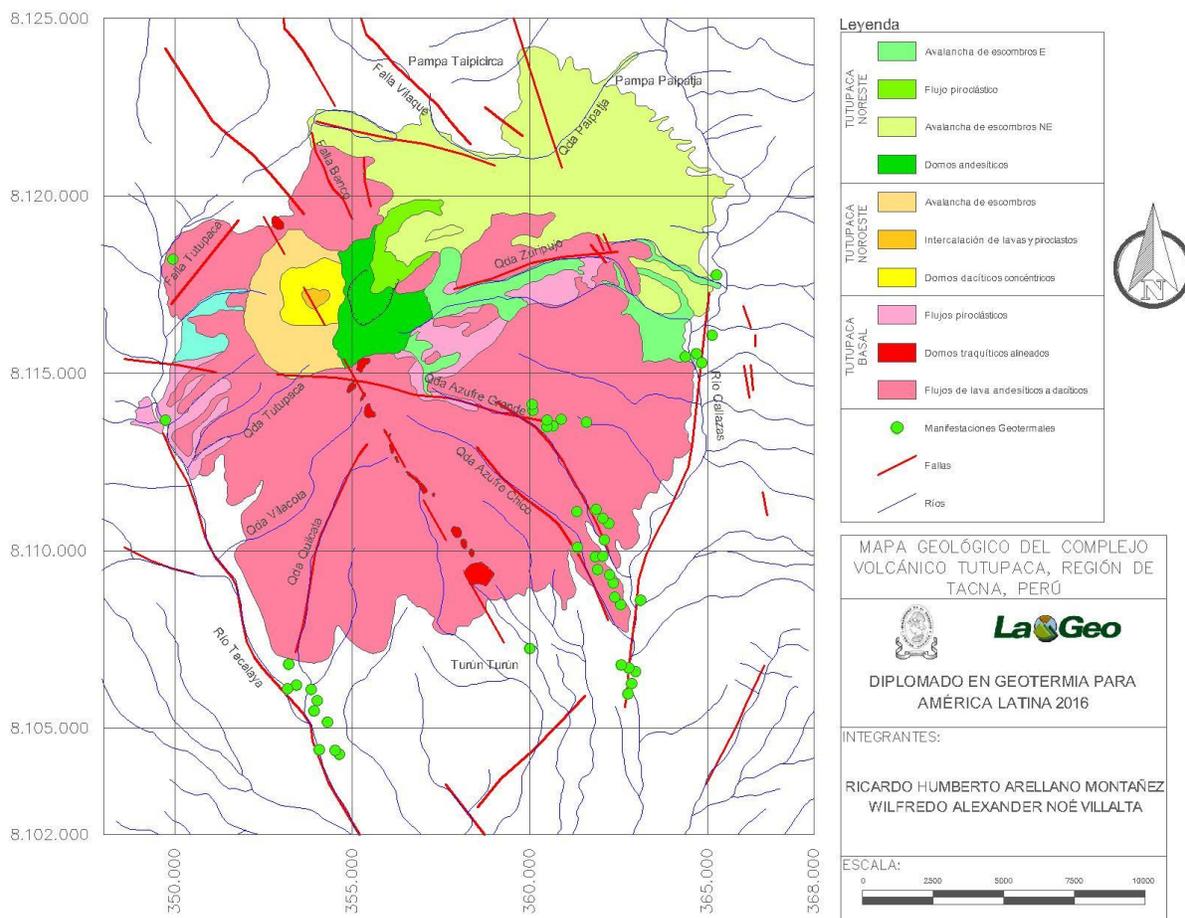


Figura 6 Mapa Geológico del Volcán Tutupaca (Modificado de Samaniego, Mariño, & Manrique, 2012)

## **Secuencias piroclásticas pre-colapso**

Se han identificado varias secuencias piroclásticas constituidas por flujos de bloques y ceniza ubicados en los valles que nacen al pie de los domos del Tutupaca Noreste. Estas secuencias se observan claramente en la Quebrada Zuripujo, en cuya parte proximal se encuentran suprayaciendo los depósitos de la avalancha de escombros del edificio Tutupaca Basal, mientras que en la parte distal, cerca al valle del río Callazas, aparecen como una secuencia constituida por varias unidades de flujos de bloques y ceniza, con espesores métricos (2-5 m) intercaladas con niveles de oleadas piroclásticas y un nivel enriquecido en ceniza al tope de la secuencia con un espesor de 1-2 m. Los bloques dominantes en esta secuencia son andesitas grises porfiríticas con una mineralogía similar al resto del edificio, es decir constituida por plagioclasa, anfíbol y biotita. Dado que esta secuencia distal se encuentra cubierta por un suelo incipiente de pocos centímetros de espesor, se considera que es relativamente joven. Una muestra de carbón recopilada en la parte superior de la secuencia permitirá determinar la edad de la misma.

## **Secuencia piroclástica sin-colapso**

En el flanco NE del volcán hacia la pampa Taipicirca se ha identificado una secuencia piroclástica constituida por dos unidades de flujo. La unidad inferior aflora en la parte media y distal y aflora muy bien en la pampa Taipicirca y en algunas quebradas que desembocan en el río Callaza. En la parte distal, esta unidad presenta un espesor de 5-6 m y está constituida por un depósito de bloques y ceniza con un enriquecimiento en bombas tipo “coliflor” y “corteza de pan” hacia el tope del depósito. Los bloques densos son dacitas gris oscuras muy porfiríticas con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita, mientras que las bombas más vesiculadas son de color gris claro, con grandes fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita. Más hacia la parte proximal aflora la unidad superior, la cual se caracteriza por ser un depósito de bloques y ceniza con espesores de hasta 5 m. Los bloques son subangulosos a sub-redondeados, con un tamaño comprendido entre 20 cm y 2 m (ocasionalmente hasta 10 m de diámetro), con fenocristales de plagioclasa, anfíbol y biotita englobados en una matriz vítrea a parcialmente cristalizada de color gris oscuro.

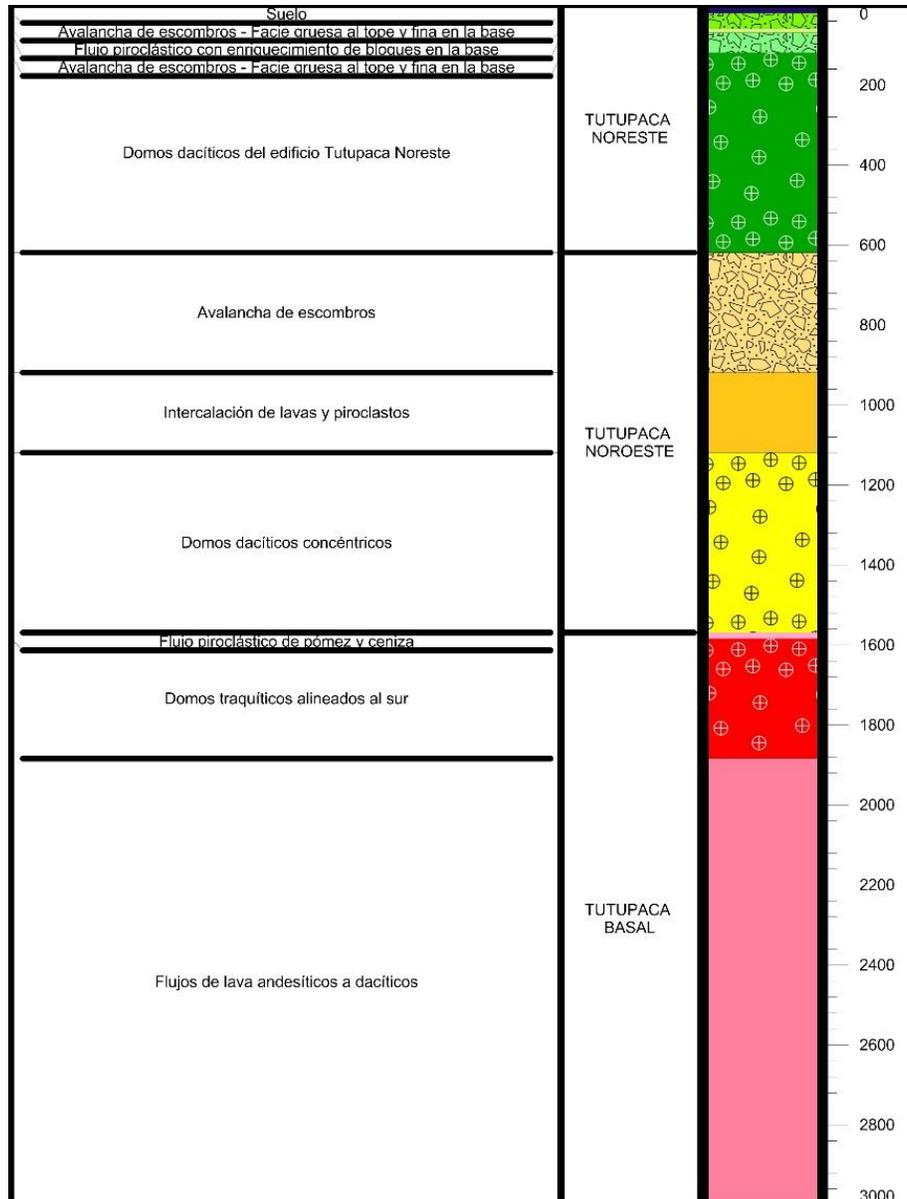


Figura 7 Columna estratigráfica del CVT

## GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

El contexto estructural está caracterizado principalmente por lineamientos regionales de rumbo NO-SE y localmente existen fallas NNO-SSE y NNE-SSO que controlan la ubicación de sistemas hidrotermales.

Las estructuras locales NNO-SSE parecen condicionar las surgencias de las manifestaciones hidrotermales, como es el caso de las quebradas Azufre Grande y Azufre Chico (De la Cruz & De la Cruz, 2001).

## **ESTRUCTURAS TECTÓNICAS DEL CVT**

El Complejo Volcánico Tutupaca se encuentra emplazado en una región tectónicamente activa, en la cual se diferencian dos sistemas principales:

### **Sistema NE-SO**

Este sistema fue afectado posteriormente por la tectónica de dirección andina, estas estructuras son de menor extensión (Morche, 1994). Entre las principales estructuras tenemos:

- Falla Tutupaca: Ubicada al noroeste del Complejo Volcánico Tutupaca, con dirección N43°E y con una longitud aproximada de 2 km.
- Falla Quilcata: Ubicada al Suroeste del complejo volcánico Tutupaca, presenta una longitud aproximada de 4 km.

### **Sistema NO-SE**

Este sistema está relacionado al emplazamiento y fracturamiento de los principales estratovolcanes plio-cuaternarios y manifestaciones hidrotermales (Morche, 1994). Se caracteriza por la presencia de fallas normales con componente sinistral con una dirección N140° (ver Figura 8). Estas fallas afectan depósitos aluviales y fluvio-glaciares y además se identifican volcanes alineados con el mismo rumbo de las fallas, lo cual indicaría la actividad de estas (Benavente, Carlotto, & del Castillo, 2010). Entre las estructuras de este sistema, se encuentran:

- Falla Banco: Se encuentra ubicada al Norte del complejo volcánico Tutupaca, se puede reconocer su traza en el flanco oriental del Cerro Banco, con una longitud aproximada de 7.5 km, presenta una escarpa de 20 m y azimut de N345° y un buzamiento hacia el Oeste. Esta falla, que tiene un componente normal importante hacia el Sur, atraviesa al edificio Tutupaca Reciente y hacia el Norte atraviesa la laguna Suches.
- Falla Vilaque: Situada al Norte del complejo volcánico Tutupaca sigue la dirección de los cerros Sasahune, Chocollo y Vilaque. Presenta una longitud aproximada de 3 km.
- Falla Tacalaya: esta falla condiciona la dirección del río Tacalaya y está ubicada entre el Complejo Volcánico Tutupaca y el edificio Chiquiananta. Tiene una longitud aproximada de 15 km.
- Falla Azufre Grande: Situada en la parte Sur del complejo volcánico Tutupaca, esta falla afecta los flujos de lavas del Tutupaca, con una longitud aproximada de 5 km.

- La secuencia de domos del edificio Tutupaca Basal tiene una dirección NO-SE y pareciera que fue formada por ascenso magmático a través de una falla paralela a las fallas Tacalaya y Azufre Grande.

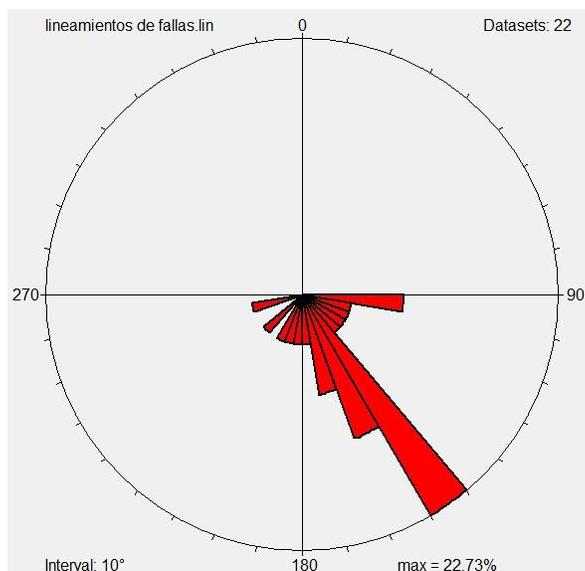


Figura 8 Diagrama de Roseta de las direcciones de las fallas del CVT

## MANIFESTACIONES HIDROTERMALES

En el CVT se han inventariado 36 manifestaciones hidrotermales (ver Figura 9), las cuales comprenden fuentes termales y fuentes de vapor y afloran principalmente en 4 sectores: la pampa de Turun Turun, el Río Tacalaya y las quebradas Azufre Grande y Azufre Chico (Cruz Paucara, Vargas Rodríguez, & Cacya Dueñas, 2013). Las fuentes de Azufre Grande y Azufre Chico se encuentran alrededor de los 4200 msnm y descargan al Río Callazas, mientras que las fuentes de Tacalaya se encuentran alrededor de los 4070 msnm y descargan al Río Tacalaya.

## CARACTERÍSTICAS HIDROQUÍMICAS

Las fuentes termales en el sector del Río Tacalaya tienen temperaturas que varían entre los 34 y los 56°C, lo que las hace las más bajas en todo el CVT (ver Figura 9), tienen valores de pH que van de ácido a neutro (2-7) y han originado depósitos de sinter (Cruz Paucara, Vargas Rodríguez, & Cacya Dueñas, 2013).



Tabla 1 Parámetros de muestras de la manifestaciones hidrotermales (Cruz Paucara, Vargas Rodríguez, & Cacya Dueñas, 2013)

FUENTE	TEMPERATURA (°C)		pH	CONDUCTIVIDAD (microS/cm)	FLUJO (l/min)
	FUENTE	AMBIENTE			
Azufre Grande 1	62.6	11.3	2.90	2.320	80
Tacalaya 1	57.8	13.0	6.90	2.910	80
Azufre Grande 2	61.9	11.0	2.71	2.820	80
Tacalaya 2	57.7	15.5	6.91	2.850	80
Azufre Chico	49.3		2.69	2.370	70
Azufre Grande 3	61.6		2.76	2.350	80

Las fuentes termales de las quebradas Azufre Grande y Azufre Chico tienen una elevada concentración del ion  $\text{SO}_4$ , siendo este el ion dominante y un ion característico de aguas volcánicas; mientras que las fuentes del Río Tacalaya tienen como ion dominante al  $\text{HCO}_3$  (Cruz Paucara, Vargas Rodríguez, & Cacya Dueñas, 2013).

Tabla 2 Composición química de muestras de las manifestaciones hidrotermales (Cruz Paucara, Vargas Rodríguez, & Cacya Dueñas, 2013)

FUENTE	Li mg/L	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Cl mg/L	F mg/L	$\text{SO}_4$ mg/L	$\text{HCO}_3$ mg/L	B mg/L	As mg/L	$\text{SiO}_2$ mg/L
Azufre Grande 1	1	310	24	185	42	179	5	1206		6	2	213
Tacalaya 1	2	639	47	65	8	415	1	412	662	12	1	125
Azufre Grande 2		173	25	156	42	190		1082		6		214
Tacalaya 2	2	590	42	55	6	421		379	575	12		120
Azufre Chico	1	196	16	127	34	160		1214		4	2	
Azufre Grande 3	1	173	22	138	37	182		1151		5	2	

## CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS TERMALES

La composición relativa de los aniones dominantes  $\text{Cl} - \text{SO}_4 - \text{HCO}_3$  para las aguas termales en la zona de Tutupaca se muestra en la Figura 10, donde se aprecia que las muestras de Azufre Grande y Azufre Chico se localizan principalmente sobre la región sulfatada, característico de aguas volcánicas ácidas que se originan de aguas subterráneas bicarbonatadas y oxigenadas muy cercanas a la superficie, que condensan a los gases como el vapor de agua,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , entre otros asociados al sistema hidrotermal Tutupaca. En la misma figura se puede observar que las aguas de Tacalaya están localizadas sobre la región bicarbonatada, cerca del vértice del tipo de aguas diluidas o mezcladas con aguas superficiales.

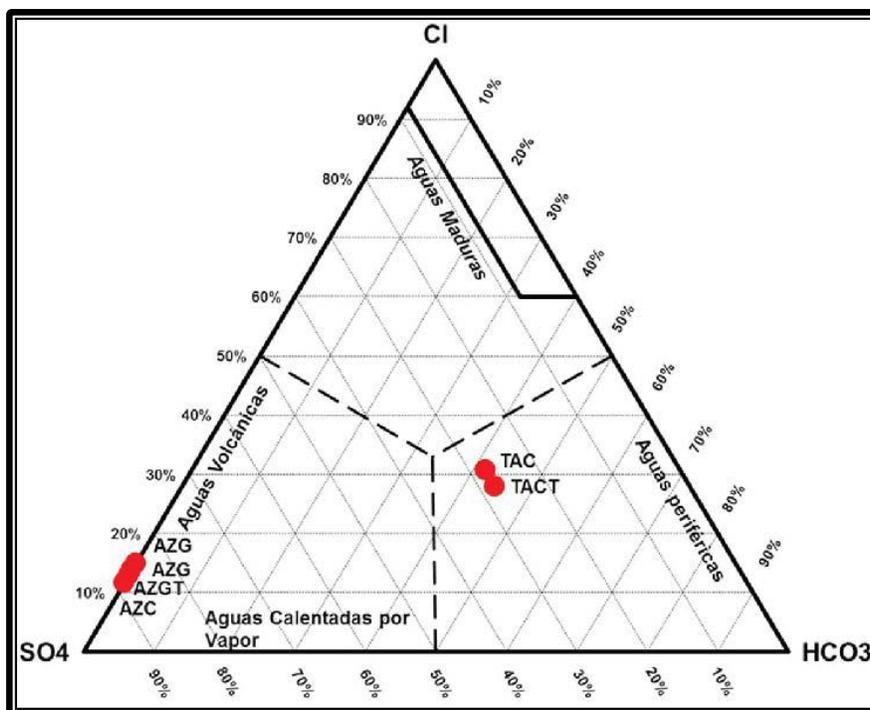


Figura 10 Clasificación de fuentes termales asociadas a la zona geotermal de Tutupaca (Cruz Paucara, Vargas Rodríguez, & Cacya Dueñas, 2013)

## GEOTERMÓMETROS

Solamente se encontraron geoindicadores de Na-K-Mg para las aguas de Tacalaya y no para las muestras ácidas de Azufre Grande y Azufre Chico. En la Figura 11, el geoindicador muestra que las aguas de Tacalaya son inmaduras, pero que tienden hacia el equilibrio parcial, de ahí que se encuentran muy cerca de esta línea, por lo que se puede mencionar que las aguas de Tacalaya están sufriendo dilución o mezcla con aguas superficiales (Cruz Paucara, Vargas Rodríguez, & Cacya Dueñas, 2013). La misma figura muestra una tendencia lineal que apunta a una temperatura de equilibrio Na/K de 200°C del reservorio. Así mismo en la Tabla 3 se muestran los resultados de las temperaturas calculadas mediante el uso de los geotermómetros químicos.

Tabla 3: Resultados del cálculo de temperaturas por geotermómetros

Fuente	Sílice amorfa	Calcedonia cond	Cuarzo cond	Cuarzo adiabatico	Na-K-Ca	Na-K-Ca-Mg corregido	Na/K Fournier	Na/K Truesdell	Na/K Giggenbach	K/Mg Giggenbach
Tacalaya 1	26.3	122.13	148	141	176	76	189	154	207	111
Tacalaya 2	28.5	124.83	150	143	177	64	192	157	209	110

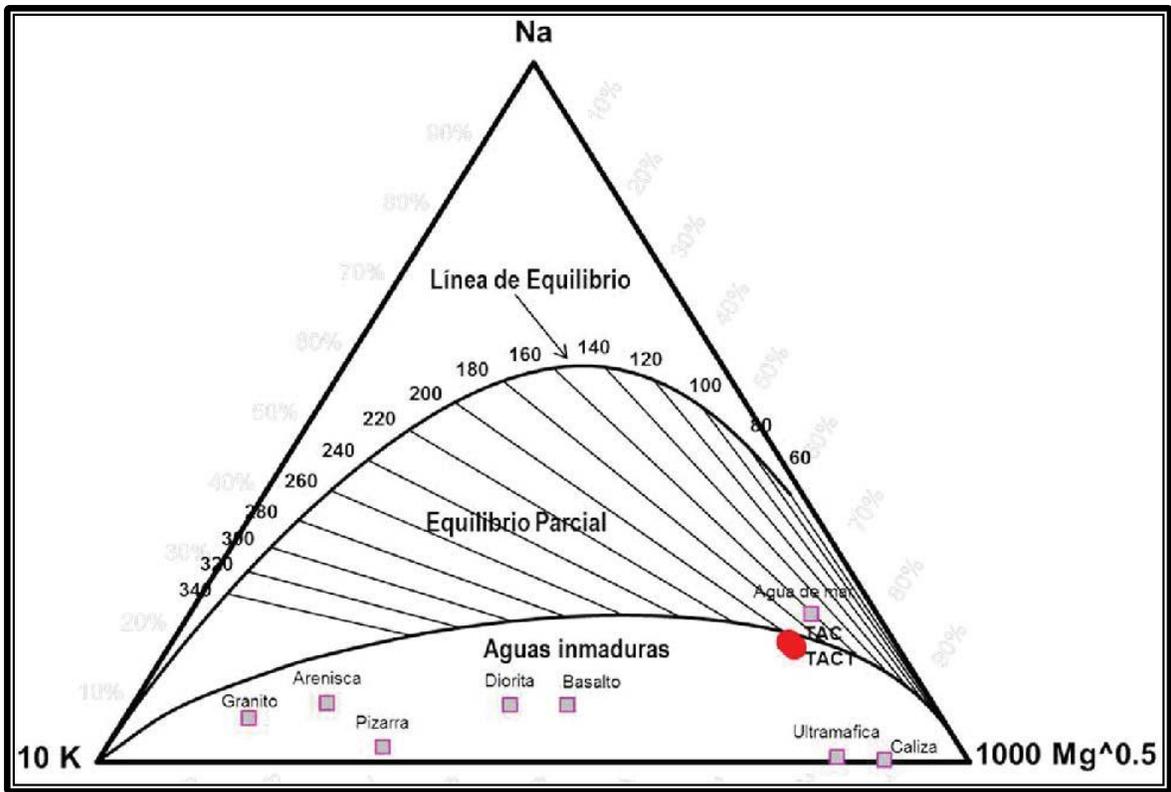


Figura 11 Geotermómetro de Na-K-Mg para las aguas termales del CVT

# MODELO GEOLÓGICO

## FUENTE DE CALOR

Toda la morfología y génesis de las distintas formaciones y estructuras del Complejo Volcánico Tutupaca están estrechamente ligadas a la actividad volcánica del Volcán Tutupaca, cuya erupción más reciente se remonta al año 1902. La región en la que se encuentra el CVT ha tenido actividad volcánica desde el Cretácico Superior y esa actividad ha sido constante, manteniéndose hasta la actualidad, es decir, la región ha tenido una presencia de calor constante durante todo este tiempo. La cámara magmática del Volcán Tutupaca sería la fuente de calor necesaria de un posible sistema geotérmico en la zona.

## ZONA DE RECARGA

La zona de recarga del posible sistema geotérmico del Complejo Volcánico Tutupaca tendría que estar ubicada en la zona de los domos de los edificios Tutupaca Noroeste y Tutupaca Noreste, debido a que estas son las zonas más altas y con glaciares permanentes. Al observar que las quebradas Azufre Grande y Azufre Chico son las que tienen las manifestaciones hidrotermales que indican una posible zona de interés geotérmico, la zona de recarga debería estar ubicada en el sector sureste de los domos ya mencionados.

## RESERVORIO

Las zonas de reservorio requieren tener una buena permeabilidad que permita la permanencia de fluidos dentro de ellas. De las formaciones descritas, hay 2 formaciones/miembros que tienen las mejores características teóricas para ser una posible zona de reservorio: la primera es el miembro Huanuara de la formación Huaylillas, que tiene un espesor de 300 m y se encuentra aproximadamente a 1200 m de profundidad; la segunda es la formación Huilacollo, que tiene un espesor de 600 m y se encuentra aproximadamente a 1900 m de profundidad. Ambas formaciones/miembros están compuestos por intercalaciones de tobas, lavas y brechas, con algunas diferencias texturales y composicionales.

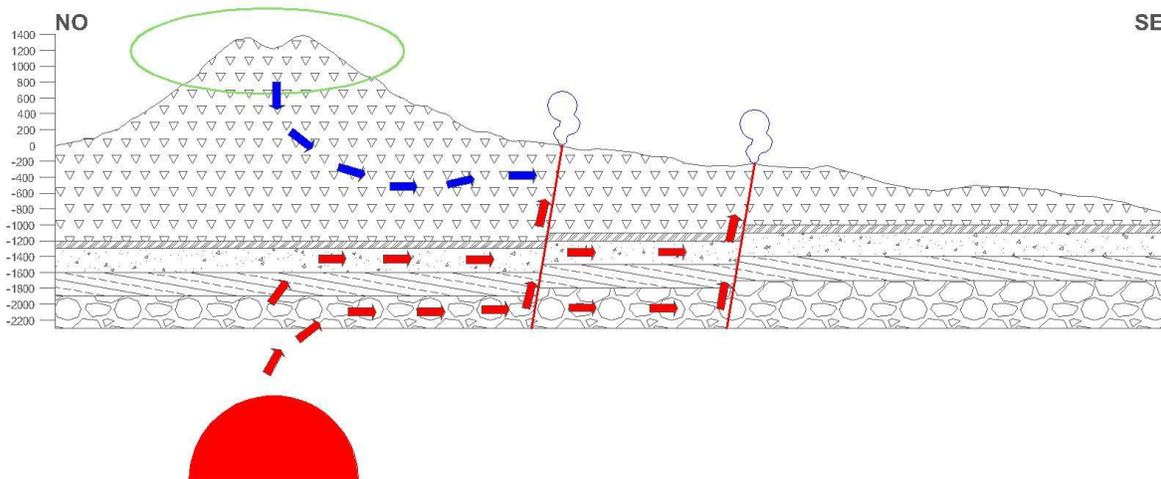
## CAPA SELLO

Las capas sello requieren tener 2 condiciones básicas: la primera es que deben ser zonas con una permeabilidad muy baja y la segunda es que deben encontrarse por encima y muy cerca de la zona de reservorio. Estas condiciones favorecerían que el fluido geotérmico no se desplace a zonas en las que se pudiera enfriar. De las formaciones descritas, hay 2 formaciones/miembros que cumplen teóricamente las características necesarias para ser una capa sello: la primera es la Formación Sencca, formada por ignimbritas, que podría ser la capa sello de un posible reservorio ubicado en el miembro Huanuara descrito anteriormente; la segunda es el miembro Chubiraca de la Formación Huaylillas compuesto

por tobas, que podría ser la capa sello para un posible reservorio ubicado en la Formación Huilacollo.

## ZONA DE ASCENSO

Las zonas de ascenso son zonas en las que los fluidos geotérmicos pueden desplazarse verticalmente de una manera relativamente fácil. En el caso del Complejo Volcánico Tutupaca, las manifestaciones hidrotermales de la zona, la presencia de domos alineados y las direcciones de muchos de los drenajes hacen notar que el sistema estructural que está dominando localmente es el NNO-SSE. El hecho de que las manifestaciones hidrotermales de Azufre Grande, Azufre Chico y Tacalaya estén alineadas en esa dirección preferencial, permite decir que esas fallas son favorables para el ascenso de fluidos y es muy probable que estén controlando las zonas de ascenso del posible sistema geotérmico. Dentro de estas 3 zonas, las que generan mayor interés son las ubicadas en las zonas altas de la quebrada Azufre Grande, ya que son aguas sulfatadas, con altas temperaturas y con presencia de vapor.



### Leyenda:

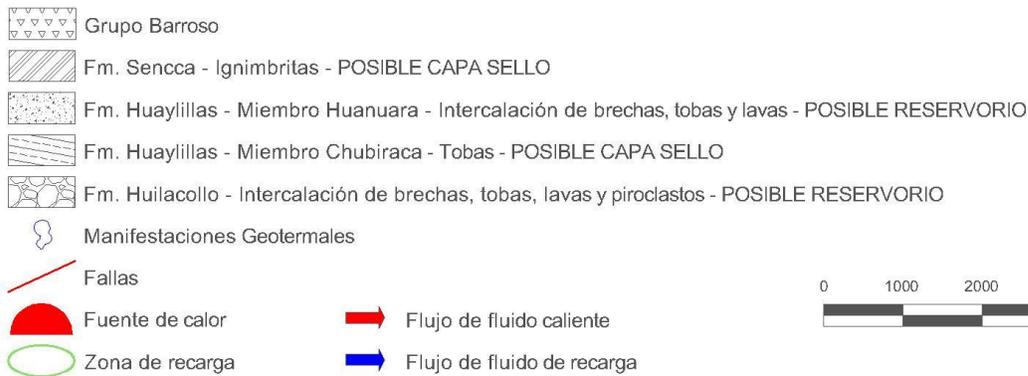


Figura 12 Esquema del Modelo Conceptual Geológico del Complejo Volcánico Tutupaca

## RECOMENDACIONES

- Hacer estudios hidrogeológicos y geoquímicos para determinar cuál es el patrón de circulación de las aguas en el CVT. Con estos estudios también se podría definir cuál es la zona de recarga y cuál es el origen de las aguas de recarga, si es agua proveniente de los glaciares de la zona o es agua proveniente de las precipitaciones de la zona. Los estudios que se realicen deben incluir un balance hídrico.
- Hacer y/o revisar las descripciones petrográficas para tratar de describir y definir con más detalle las unidades estratigráficas locales y regionales.
- Realizar estudios geofísicos que permitan caracterizar a profundidad los principales componentes del sistema geotérmico.
- Realizar un estudio más exhaustivo de las manifestaciones hidrotermales. Determinar procedencia de los fluidos, temperaturas en el reservorio y aumentar el número de muestras para clasificación de las aguas.
- Realizar una descripción de las manifestaciones hidrotermales del Río Callazas y de las ubicadas en las cabeceras de la Quebrada Tacalaya. Igualmente, explorar la zona norte del volcán en busca de posibles manifestaciones hidrotermales en las fallas de rumbo NO-SE.
- Realizar un levantamiento geológico de las fallas ubicadas en el sector norte del CVT, para observar, entre otras cosas, una posible presencia de fluidos en las fallas de orientación NO-SE.
- Realizar perforaciones de diámetro pequeño para determinar gradiente geotérmico en la zona.

## REFERENCIAS

- Benavente, C., Carlotto, V., & del Castillo, B. (2010). Extensión en el arco volcánico actual del sur del Perú. *XV Congreso Geológico Peruano, Resúmenes Extendidos* (págs. 766 - 769). Cusco: Sociedad Geológica del Perú.
- Coronado Triviño, Y. C., & Garciadiego Martínez, A. M. (2015). *Metodología para la elaboración de un modelo conceptual a partir de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos en la fase de reconocimiento y prefactibilidad de un proyecto geotérmico*. Universidad de El Salvador, San Salvador.
- Cruz Paucara, V., Vargas Rodríguez, V., & Cacya Dueñas, L. (2013). *Caracterización y evaluación del potencial geotérmico de la Región Tacna*. INGEMMET, Lima.
- De la Cruz, N., & De la Cruz, O. (2001). *Mapa geológico del cuadrángulo de Tarata*.
- Fidel, L., & Zavala, B. (2001). *Mapa geomorfológico del sistema volcánico Tutupaca*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Lima.
- Jaén La Torre, H. (1965). *Geología del cuadrángulo de Tarata*. Lima, Perú: Comisión Carta Geológica Nacional.
- Manrique Llerena, N. V. (2013). *Evolución vulcanológica y magmática del edificio reciente del complejo volcánico Tutupaca (Tacna)*. Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de Geología, Geofísica y Minas, Arequipa.
- Morche, W. (1994). *Estudio geovolcánico e inventario sistemático de manifestaciones geotermales del lote Tutupaca*. INGEMMET, Lima.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal fluids: chemistry and exploration techniques*. Berlín.
- Organización Latinoamericana de Energía. (1994). *Guía para la evaluación del potencial energético en zonas geotérmicas durante las etapas previas a la factibilidad*. OLADE. Quito: OLADE.
- Samaniego, P., Mariño, J., & Manrique, N. (2012). Datos preliminares sobre la evolución vulcanológica del Complejo Volcánico Tutupaca. En S. G. Perú (Ed.), *XVI Congreso Peruano de Geología*, (pág. 6). Lima.
- Wörner, G., Moorbath, S., & Harmon, R. (1992). Andean Cenozoic volcanic centers reflect basement isotopic domains. *Geology*, 20(12), 1103 - 1106.