



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN DE LA MINERALOGÍA DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL EN SUPERFICIE DEL VOLCÁN TACORA Y SUS ALREDEDORES, REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ÁLVARO JAVIER CONTRERAS PÉREZ

PROFESOR GUÍA

DIEGO MORATA CÉSPEDES

PROFESOR CO-GUÍA

MARTIN REICH MORALES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

ALFREDO LAHSEN AZAR

DIEGO GAYTAN BAHAMONDEZ

SANTIAGO DE CHILE

ENERO, 2013

Resumen

En el extremo norte de Chile, a 100 km al Noreste de la ciudad de Arica, cerca del límite entre la Pre-Cordillera y la Cordillera Occidental, se encuentra el volcán Tacora. Este es un estratovolcán ubicado a la Zona Volcánica Central (ZVC) y los estudios geológicos existentes de la zona de estudio indican la presencia de unidades del Cenozoico Superior, correspondientes a secuencias volcánicas con edades miocenas a recientes, unidades sedimentarias continentales, depósitos glaciales y coluviales pleistocenos, depósitos palustres y aluviales cuaternarios. De manera adicional, se ha identificado una serie de zonas de alteración hidrotermal las cuales se distribuyen entre los depósitos glaciales y coluviales, y las lavas miocenas ubicadas al Oeste y Suroeste de la zona de estudio.

El objetivo de este estudio es la caracterización de la mineralogía de alteración presente en el área de volcán Tacora, identificando su naturaleza y distribución, de manera de poder establecer un modelo conceptual de la distribución de los mismos. Para llevar a cabo este estudio se ha hecho un análisis mediante sensores remotos; estudios en terreno, petrografía y difracción de rayos X.

Esto arrojó como resultado un mapa de alteración hidrotermal en el cual se identifican tipos de alteración hidrotermal desde propilítica hasta argílica avanzada. Estos tipos de alteración quedan definidos por distintas asociaciones minerales a partir de las cuales se pueden estimar las condiciones de ocurrencia de los eventos de alteración, en términos de temperatura y pH. Adicionalmente se infieren los posibles orígenes de estas zonas de alteración hidrotermal.

En el caso de volcán Tacora se han identificado las asociaciones minerales: (1) cuarzo-cristobalita±tridimita±ópalo-A. (2) azufre, cristobalita-jarosita±anhidrita/yeso. (3) esmectita-jarosita-pirita. Todas estas alteraciones se relacionarían con la interacción de fluidos sulfatados con aguas meteóricas someras ubicadas en el sector superior de Volcán Tacora.

En el caso de Formación Oxaya, las asociaciones minerales identificadas corresponderían a: (4) clorita-epidota±calcita±óxidos±pirita. (5) cuarzo-alunita±caolinita-jarosita y zunyita. (6) cuarzo-illita±sericita±muscovita. Estas asociaciones indican una evolución en las condiciones de formación de la alteración hidrotermal.

Finalmente esta ocurrencia y distribución de la mineralogía de alteración permite generar un modelo conceptual de la alteración presente en la superficie de la zona de estudio.

*Belleza volverá a encantarte con su gracia;
tu celda de tristeza se trocará en un jardín de rosas.
No te aflijas: tu mal será trocado en bien;
no te detengas en lo que te inquieta,
pues tu espíritu conocerá de nuevo la paz.
No te aflijas: una vez más la vida volverá a tu jardín
y pronto verás, ¡oh cantor de la noche!
una corona de rosas en tu frente.
No te aflijas si, algún día,
las esferas del cosmos no giran según tus deseos,
pues la rueda del tiempo no gira siempre en el mismo sentido.
No te aflijas si, por amor,
penetras en el desierto y las espinas te hieren.
No te aflijas, alma mía,
si el torrente del tiempo arrastra tu morada mortal,
pues tienes el amor para salvarte del naufragio.
No te aflijas si el viaje es amargo,
no te aflijas si la meta es invisible.
Todos los caminos conducen a una sola meta.
No te aflijas, Hafiz,
en tu rincón humilde en que te crees pobre,
abandonado a la noche oscura,
y piensa que aún te queda tu canción y tu amor.*

-Hafiz, poeta persa-

Agradecimientos

Quiero agradecer al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA), Proyecto FONDAP N°15090013, financiado por la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONYCIT), a mi profesor guía Diego Morata, profesor co-guía Martin Reich, y miembros de la comisión, Alfredo Lahsen y Diego Gaytán, por sus comentarios, sugerencias y su buena disposición a colaborar durante el desarrollo de esta memoria. A Mercedes Vázquez por su gran ayuda con la interpretación de los resultados de difracción de rayos X. A la empresa Serviland Minergy S.A. por financiar mi memoria de Título, y por la enorme paciencia que han tenido para conmigo.

Agradezco a mis padres, por todo el cariño y apoyo que me han brindado, todos los años de sacrificios y esfuerzo que pusieron para brindarme una buena educación. Así también a mi tío Gastón y tía Nelly, quienes junto a mis padres son mi núcleo familiar. A todos mis tíos y primos que se encuentran en Concepción, Noruega y Suecia, se les quiere mucho y se les agradece por su cariño, compañía y apoyo.

Quiero saludar también a todos mis amigos, compañeros de la vida, estudios, terrenos y fiestas, con quienes hemos pasado muy buenos momentos. A mis amigos del barrio, amigos de la infancia, a Rony que si bien no somos hermanos, nos criamos juntos casi como hermanos, a Jesús, Seba, Cristian, Toño y Daniel con quienes he compartido toda mi infancia y juventud. A la familia Muñoz Suban, por esa gran amistad que comenzó en los años de la escuela básica y que se ha mantenido desde entonces. A los amigos que formé en los primeros años de la U: Joaco, Nico Ramos, Jota, Matías Contador y Chunchu. A esas grandes personas que conocí cuando entré a Geología: Manuel “*Manfred*” Olivares, Javier “*Buho*” Cortés, Claudio “*Papi Jack*” Vergara, Rafa, Ricardo “*Tincola*” Celis, Javi Morandé, Tutú, Leo, “*Joakim*” Navarro, Juanaka, Dragón, Diego Aravena, Rodalarc, Chapa, Cata Carreño, Pancha Espinoza, Matías “*Atax*” Peña, Javier “*Locura*” Álvarez, a Oniver, Catarino, Miguel Ángel, Acel, Hernán Porras, Monse y Don “*Checho*” Calderón, por su buena onda, simpatía y amistad.

Muchísimas gracias a María Rosa por su simpatía, cariño y consejos brindados. A Blanca por toda su buena disposición y ayuda brindada previo a la entrega de este trabajo de título. A “*Yan Clos*” y a todos los simios y simias que eran parte de esa banda que tantas alegrías me trajo. A los amigos memoristas Mary, Vale, Tomás, Caro Díaz, Rodalarc, Cami, Pelao Acevedo, Guga y Joe.

A mis amigos anglo- y franco-parlantes Caro, Kate, Rachel, Flo, Britt, Jeff, Rick, Josh, Franny, Luke, Sab y Fred. Con los cuales he pasado muy buenos momentos. Con algunos nos veremos acá en Chile y con otros seguramente nos veremos en otra parte del mundo.

A todos ustedes: ¡MUCHAS GRACIAS!

Tabla de contenido

Resumen.....	ii
1. Introducción	1
1.1. Organización del trabajo	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Ubicación y vías de acceso.....	2
1.4. Clima y vegetación.....	3
1.5. Objetivos	3
1.6. Metodología de trabajo.....	5
1.6.1. Trabajo de gabinete	5
1.6.2. Trabajo de terreno	6
1.6.3. Trabajo de laboratorio	8
1.7. Hipótesis de trabajo.....	9
1.8. Alteración hidrotermal en campos geotermales activos.....	9
1.8.1. Introducción	9
1.8.2. Procesos de alteración hidrotermal.....	9
1.8.3. Factores de la alteración hidrotermal	10
1.8.4. Composición de los fluidos geotermales y su relación con la alteración hidrotermal.	11
1.9. Modelo conceptual de un sistema geotermal	11
2. Marco geológico de la zona de estudio	15
2.1. Introducción	15
2.2. Marco geológico regional.....	15
2.2.1. Volcanismo y tectónica en Los Andes	15
2.2.2. Unidades morfo-estructurales de Los Andes.....	17
2.3. Marco geológico local.....	18
2.3.1. Formación Oxaya (Oligoceno Superior - Mioceno Inferior)	18
2.3.2. Formación Visviri (Plioceno Superior - Pleistoceno Inferior)	19
2.3.3. Volcán Tacora (Pleistoceno Medio).....	20
2.3.4. Depósitos glaciales (Pleistoceno Superior)	22
2.3.5. Depósitos coluviales (Pleistoceno Superior)	22
2.3.6. Depósitos aluviales y palustres (Holoceno)	23
2.4. Geología estructural	23

3.	Manifestaciones termales en superficie.....	26
3.1.	Campos de fumarolas.....	26
3.2.	Manantiales calientes.....	26
4.	Resultado del análisis de alteración hidrotermal mediante sensores remotos.....	28
5.	Resultados de la caracterización de la mineralogía de alteración hidrotermal.....	31
5.1.	Descripción y distribución de minerales de alteración.....	31
5.1.1.	Azufre.....	31
5.1.2.	Fases silíceas.....	32
5.1.3.	Filosilicatos.....	34
5.1.4.	Sorosilicatos.....	39
5.1.5.	Sulfatos.....	39
5.1.6.	Sulfuros.....	41
5.1.7.	Carbonatos.....	41
5.1.8.	Óxidos e hidróxidos.....	41
5.2.	Tipos de alteración y asociaciones minerales.....	44
5.2.1.	Alteración propilítica.....	44
5.2.2.	Alteración argílica.....	44
5.2.3.	Alteración argílica avanzada.....	45
5.2.4.	Silicificación.....	45
5.2.5.	Alteración superficial.....	45
6.	Discusiones.....	48
6.1.	Resultados de la caracterización de la mineralogía de alteración.....	48
6.1.1.	Volcán Tacora.....	48
6.1.2.	Formación Oxaya.....	54
6.1.3.	Comparación de la alteración presente en volcán Tacora y Formación Oxaya.....	59
6.2.	Resultados del análisis de alteración mediante sensores remotos.....	61
7.	Conclusiones.....	62
8.	Recomendaciones.....	64
9.	Bibliografía.....	65
	Anexo A: Ubicación de las muestras.....	69
	Anexo B: Descripción de mineralogía de alteración.....	71
	Anexo C: Resultados de DRX.....	84

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de aguas geotermales, su ocurrencia, características químicas, manifestaciones superficiales y tipo de alteración asociadas. Tomado de Nicholson (1993).....	12
Tabla 2. Síntesis de la mineralogía de alteración identificada en la zona de estudio. En esta se distingue una distribución en la ocurrencia de los minerales de alteración.	43
Tabla 3. Comparación de la alteración presente en las zonas de volcán Tacora y Formación Oxaya, en términos de los tipos de alteración, condiciones de formación (T, pH), origen y edad de la alteración.	59

Índice de Figuras

Figura 1-1. Mapa de ubicación y vías de acceso del área de estudio. Se destaca en el recuadro rojo la ubicación de la concesión geotérmica Volcán Tacora. Se identifican las vías de acceso: ruta internacional Libertador José de San Martín, 11-CH (rojo) y la ruta A-23 (marrón).	4
Figura 1-2. Espectro de transmisión atmosférica, donde destaca, en bandas grises, las bandas espectrales que utilizan las imágenes ASTER. Modificado de Rowan y Hook (2003).....	6
Figura 1-3. Mapa de distribución de las zonas de alteración hidrotermal identificadas y los puntos de muestreo efectuados durante el trabajo de terreno.	7
Figura 1-4. Modelo conceptual de un sistema geotermal asociado a volcanismo activo destacándose la naturaleza y distribución de manifestaciones superficiales y aguas geotermales. Además se indica la fuente de calor, estructura termal, hidrología y los procesos ocurridos al interior del sistema geotermal. Modificado de Nicholson (1993).	14
Figura 2-1. Zona volcánica central (ZVC) de Los Andes. En ésta se destaca la ubicación de algunos volcanes, y centros ignimbríticos que la componen. Además se señala el borde convergente de placas y su velocidad anual de convergencia. Modificado de Stern (2004).	16
Figura 2-2. Unidades morfo-estructurales de los Andes entre los 18°-18°30' Latitud Sur. Se destaca la presencia de volcanes de edad Pleistocena a Holocena que componen la ZVC. Adicionalmente se destaca en un cuadro rojo la zona de estudio. Abreviaciones: A, Altiplano; CC, Cordillera de la Costa; CO, Cordillera Oeste; DC, Depresión Central; PC, Pre-cordillera.	18
Figura 2-3. Foto de Volcán Tacora. A. con vista al volcán desde el Oeste, se destaca su forma cónica irregular y la presencia de depósitos glaciales en la base. B. en el flanco Noreste se presentan afloramientos de lavas grises las cuales presentan un manteo de aproximadamente 30° hacia el Noreste..	21
Figura 2-4. Foto de Volcán Tacora, destacándose la presencia del domo dacítico expuesto en el flanco Norte. Junto a éste se identifican las lavas del volcán y los depósitos glaciales ubicados en la base del mismo.	22
Figura 2-5. Mapa de la geología estructural en el borde Sur de Perú. Se destaca la orientación NW-SE del sistema de fallas Incapuquio-Challaviento (SFIC) y su posible extensión hacia el Sureste pasando por debajo de volcán Tacora (Recopilado de Acosta et al., 2011).	24
Figura 2-6. Mapa geológico del área de volcán Tacora. Modificado de García (2011).....	25
Figura 3-1. Fotos de campo de fumarolas . A. Vista al Sur del campo de fumarolas ubicado en el sector Noroeste de volcán Tacora. La línea negra delimita la extensión de este campo. Los tonos amarillos	

indican la presencia de azufre nativo. B. Vista panorámica del campo de fumarolas ubicado en el cráter. De manera similar a la foto anterior, se delimita la extensión de este campo.....	27
Figura 3-2. Vista al Sur de manantiales en Aguas Calientes. Las flechas indican algunos puntos de emisión localizados en torno al río Azufre. Se destaca el desarrollo de estas manifestaciones sobre depósitos semi-consolidados y vegetación.....	28
Figura 4-1. Mapa de minerales de alteración presentes en la superficie del área de volcán Tacora. Se destaca en un cuadro rojo los límites de la concesión geotérmica Volcán Tacora.....	30
Figura 5-1. Foto correspondiente al campo de fumarolas del NO. En ésta se identifica la presencia de un casquete relleno en su interior de azufre cristalino.	31
Figura 5-2. A. Muestra del campo de fumarolas Noroeste (código: 3.2.1.B) en la cual se destaca con círculos negros el dominio sometido a análisis de DRX. B. Difractograma de intensidad correspondiente a muestra indicada en A. Se indica la presencia de un pico con un ancho ($\Delta(2\theta)$) igual a 10° que indicaría la presencia de ópalo-A, y un pico de mayor intensidad el cual correspondería a cristobalita (ver Anexo C).	32
Figura 5-3. A. Bloque correspondiente al campo de fumarolas Oeste de volcán Tacora (código: 2.1.5). En líneas negras se destacan los dominios de la roca analizados mediante DRX. B. Difractograma de intensidad de A el que indicaría la presencia de cristobalita junto con fases silíceas tales como cuarzo (Qtz) y tridimita (Trd) (ver Anexo C).	33
Figura 5-4. Fotomicrografías, a nicoles paralelo (izquierda) y cruzado (derecha), de rocas con presencia de cuarzo como mineral de alteración. A y B. Lavas de Formación Oxaya con cuarzo en agregados microcristalinos con textura <i>jigsaw puzzle</i> como reemplazo de la masa fundamental. A la derecha se observa estructura <i>boxwork</i> con alunita (Alun) en su interior con textura-acicular, y jarosita (Jrs) en agregados criptocristalinos. C y D. Lavas de Formación Oxaya con cuarzo en agregados poli-cristalinos con bordes irregulares como reemplazo de fenocristales de feldespatos, junto con sericita (Ser). E y F. Tobas de Volcán Tacora con cuarzo en agregados criptocristalinos esferulíticos como alteración de la matriz vítrea, se presenta junto con agregados finos, con tono pardo oscuro, de esmectita (Sme).	35
Figura 5-5 A. Muestra correspondiente a Formación Oxaya (código: 1.2.2). Se destaca con líneas negras la presencia de vetillas rellenas con agregados micro-cristalinos los cuales fueron analizados por DRX. B. Difractograma de intensidad del material contenido en las vetillas identificando la presencia picos que indicarían la presencia de muscovita (Ms) y cuarzo (Q) (ver Anexo C).	37
Figura 5-6. A. Muestra perteneciente a Formación Oxaya, (código: 1.2.5.A, Anexo B). B y C. Fotomicrografías a nicoles paralelo (B) y cruzado (C) en donde se destaca la presencia de clorita (Chl), epidota (Ep), calcita (Cc) y óxidos (Óx) como producto de alteración de feldespatos y plagioclasas.....	38
Figura 5-7. A. Muestra perteneciente al campo de fumarolas Noroeste. Se destaca en círculo negro el dominio en el cual se identifica la presencia de anhídrita y yeso. B y C. Fotomicrografías de la muestra en A. Se identifica una vetilla irregular en cuyo interior la anhídrita (Anh) presenta un hábito acicular. Continuando por la vetilla hacia abajo se observa el paso de anhídrita a yeso (Gp).	40
Figura 5-8. A y B. Afloramientos de lavas pertenecientes a Formación Oxaya. Se destaca la presencia de hematita y goethita como pátinas de oxidación que le dan un tono pardo rojizo a los afloramientos.	42
Figura 5-9. (Página siguiente). Mapa de alteración correspondiente al área de volcán Tacora. En esta se presentan las distintas unidades geológicas, manifestaciones termales en superficie y tipos de alteración identificados.	46
Figura 6-1. Diagrama de estabilidad de las distintas fases silíceas. Se observa que la cristobalita y la tridimita son estables bajo condiciones de baja presión y alta temperatura. Modificado de Swamy et al. (1994).	48

Figura 6-2. Diagrama de estabilidad del sistema Al-Fe-Si-S-K-O como pH v/s $\log a(\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+})$ en condiciones de $T=15^{\circ}\text{C}$, $\log a(\text{SO}_4)=-1,87$, $\log a(\text{K})=-3,2$ y con presencia de cristobalita como fase silícea. Modificado de Zimbelman et al. (2005).....	51
Figura 6-3. Diagrama de estabilidad del sistema Al-Fe-Si-S-K-O como pH v/s $\log a(\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+})$ en condiciones de $T=100^{\circ}\text{C}$, $\log a(\text{SO}_4)=-1,87$, $\log a(\text{K})=-3,2$ y cristobalita como fase silícea presente. Modificado de Zimbelman et al (2005).....	52
Figura 6-4. Diagrama de estabilidad de sulfatos en función de pH y la razón $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^{+}$. El diagrama fue calculado a $T=100^{\circ}\text{C}$, con $\log a(\text{SO}_4)=-1,87$ y $\log a(\text{K})=-3,2$ y con cristobalita como fase silícea presente.	53
Figura 6-5. Tabla de tipos de alteración hidrotermal, con sus asociaciones minerales características, en función del pH y la temperatura. Modificado de Corbett y Leach (1998). En ésta se muestra la evolución de la alteración que habría afectado a las lavas de Formación Oxaya.	58
Figura 6-6. Tabla de tipos de alteración hidrotermal, con sus asociaciones minerales características, en función del pH y la temperatura. Modificado de Corbett y Leach (1998). En ésta se muestra con una flecha negra la evolución de la alteración en las lavas de Formación Oxaya, y en estrella roja se indica las condiciones de temperatura y pH que caracterizan a la alteración presente en volcán Tacora.	60
Figura. 7-1. Perfil geológico del área de volcán Tacora. En este se muestra la ocurrencia y distribución de las zonas de alteración en la zona de estudio destacándose las asociaciones minerales y condiciones de formación de la alteración en términos de temperatura y pH.....	63

1. Introducción

La exploración geotérmica sistemática de un área se compone de una serie de estudios, los cuales pueden dividirse en tres etapas principales: prospección superficial, estudios en profundidad y finalmente la evaluación del potencial geotérmico de dicha zona. Dentro de la primera etapa podemos mencionar, la descripción de la geología, la caracterización geoquímica de las manifestaciones termales, y los estudios de prospección geofísica. La elaboración de estos estudios es fundamental al momento de identificar una zona de interés geotermal. El objetivo de estos estudios consiste en la caracterización de una fuente de calor en profundidad, un reservorio, una zona de recarga, y una zona de descarga. Con esta información es posible realizar un modelo conceptual y así también una primera estimación de la extensión del sistema geotermal.

En Chile, la exploración geotérmica tuvo sus comienzos en el año 1968 con las primeras campañas de exploración superficial en la zona Norte de Chile, encontrándose con áreas geotermales tales como El Tatio y Puchuldiza (Lahsen, 1988). A partir de entonces numerosos trabajos de exploración se han realizado en otras partes de Chile encontrándose lugares con potencial geotermal tales como Laguna del Maule, Calabozos, Nevados de Chillán, Tolhuaca, Sierra Nevada y Cordón Caulle en la zona Centro-Sur; y Pampa-Lirima, Surire y Pampa Apacheta en el Norte de Chile. Todos estos sectores muestran un alto potencial de desarrollo geotermal (Lahsen et al., 2010).

Actualmente, la empresa de exploración geotérmica SERVILAND MINERGY S.A. se encuentra en etapa de exploración superficial de una serie de concesiones a lo largo de Chile. Una de éstas corresponde al área del Volcán Tacora, ubicada en el extremo Norte de Chile, Región de Arica y Parinacota. El presente trabajo se enfoca específicamente en la mineralogía de alteración en el área de concesión geotérmica Volcán Tacora y sus alrededores.

1.1. Organización del trabajo

El presente trabajo ha sido organizado en los siguientes capítulos:

- **Introducción:** se presenta el problema a resolver, objetivos, hipótesis, metodología utilizada para abordar el problema, hipótesis de trabajo y una descripción de los conceptos generales de la alteración hidrotermal en campos geotermales.
- **Marco geológico:** consiste en la descripción del contexto geológico de la zona de estudio partiendo desde un contexto global hasta un ámbito más local.

- Manifestaciones termales: se presenta brevemente la información de las manifestaciones termales identificadas en la zona de estudio.
- Resultados del análisis de la alteración hidrotermal mediante sensores remotos y de la descripción petrográfica de los minerales de alteración identificados en las muestras tomadas en terreno.
- Discusión de los resultados: se discuten resultados del análisis de imágenes satelitales y la caracterización petrográfica de las zonas de alteración.
- Conclusiones y recomendaciones: se concluye a partir de las discusiones de resultados obtenidos.
- Anexos: se presentan la información correspondiente a la descripción de las muestras tomadas.

1.2. Planteamiento del problema

En el contexto de la exploración superficial de la concesión Volcán Tacora, se tiene que la información geológica existente consiste en una carta geológica a escala 1:300.000 (Salas et al., 1966), lo cual constituye una base del conocimiento geológico pero que carece de un buen nivel de detalle. Este hecho motivó la confección de un mapa geológico más detallado de la zona, tarea que fue llevada a cabo por el geólogo Marcelo García, en compañía de Diego Gaytán y Álvaro Chávez, geólogos de la empresa SERVILAND MINERGY S.A. Este trabajo arrojó como resultado un mapa geológico, a escala 1:50.000, de la concesión geotérmica y de sus alrededores. En éste se definen una serie de unidades que abarcan desde rocas volcánicas miocenas hasta depósitos cuaternarios. Adicionalmente se han identificado zonas de alteración hidrotermal, ubicadas tanto dentro como fuera de la concesión geotermal (hacia el Oeste), sin una descripción detallada de la mineralogía. Es por lo anterior que se requiere realizar un estudio de la mineralogía de alteración hidrotermal presente en la superficie del área de concesión y en sus alrededores.

1.3. Ubicación y vías de acceso

La concesión geotérmica Volcán Tacora, está en la provincia de Parinacota, aproximadamente a 100 km al Noreste de la ciudad de Arica. Específicamente el área está comprendida entre los 8045102,69 y los 8038026,88 Norte; y los 424564,60 y los 414516,63 Este¹.

¹ Coordenadas UTM, WGS-84 Zona 19 Sur.

Para llegar a esta zona, desde la ciudad de Arica, se debe viajar hacia el Este por la ruta Internacional Libertador José de San Martín (11-CH), con dirección a la localidad de Putre. Aproximadamente, unos 10 km pasados del desvío hacia Putre, se debe tomar la ruta A-23, pasando por la ladera Oeste del Complejo Volcánico Taapaca, atravesar la Quebrada Allane, y recorrer aproximadamente 25 km de la ruta A-23 con dirección hacia el Norte, para llegar así a la localidad de Tacora. Desde este punto, se deben recorrer 15 km más, por la ruta A-23 con dirección Noroeste, atravesando la frontera Chile-Perú en cierto tramo, para llegar a la localidad de Aguas Calientes, lugar donde se ubican las fuentes termales del mismo nombre. Avanzando unos 5 km hacia el Noreste, por la misma ruta A-23, se accede a la concesión geotérmica (Figura 1-1). Es preciso mencionar que existen vías de acceso a los campos de fumarolas y al cráter. El acceso a este último está condicionado por la presencia de nieve en el camino y las condiciones climáticas del día.

1.4. Clima y vegetación

La base del Volcán Tacora se encuentra por sobre los 4200 m.s.n.m., de esta manera el clima predominante en la zona es de estepa de altura, con precipitaciones nivales en invierno, y precipitaciones pluviales durante los meses de verano, alcanzando los 300 mm de agua caída en el año (Biblioteca Congreso Nacional de Chile, 2007; García et al., 2004).

La vegetación en esta zona consiste principalmente en pastos que crecen en vertientes, y yareta. Esta última es una planta que se desarrolla a alturas superiores a los 4000 m.s.n.m., la cual es utilizada como leña (Salas et al., 1966).

1.5. Objetivos

El objetivo general de esta memoria consiste en la caracterizar la mineralogía de alteración hidrotermal observada en la superficie del Volcán Tacora y sus alrededores.

Los objetivos específicos son:

- Describir las zonas de alteración hidrotermal identificadas durante el levantamiento geológico preliminar.
- Identificar la naturaleza y distribución de las minerales de alteración presentes en la concesión volcán Tacora y sus alrededores.
- Desarrollar un modelo conceptual de la distribución superficial de las zonas de alteración.

Ubicación y Vías de acceso

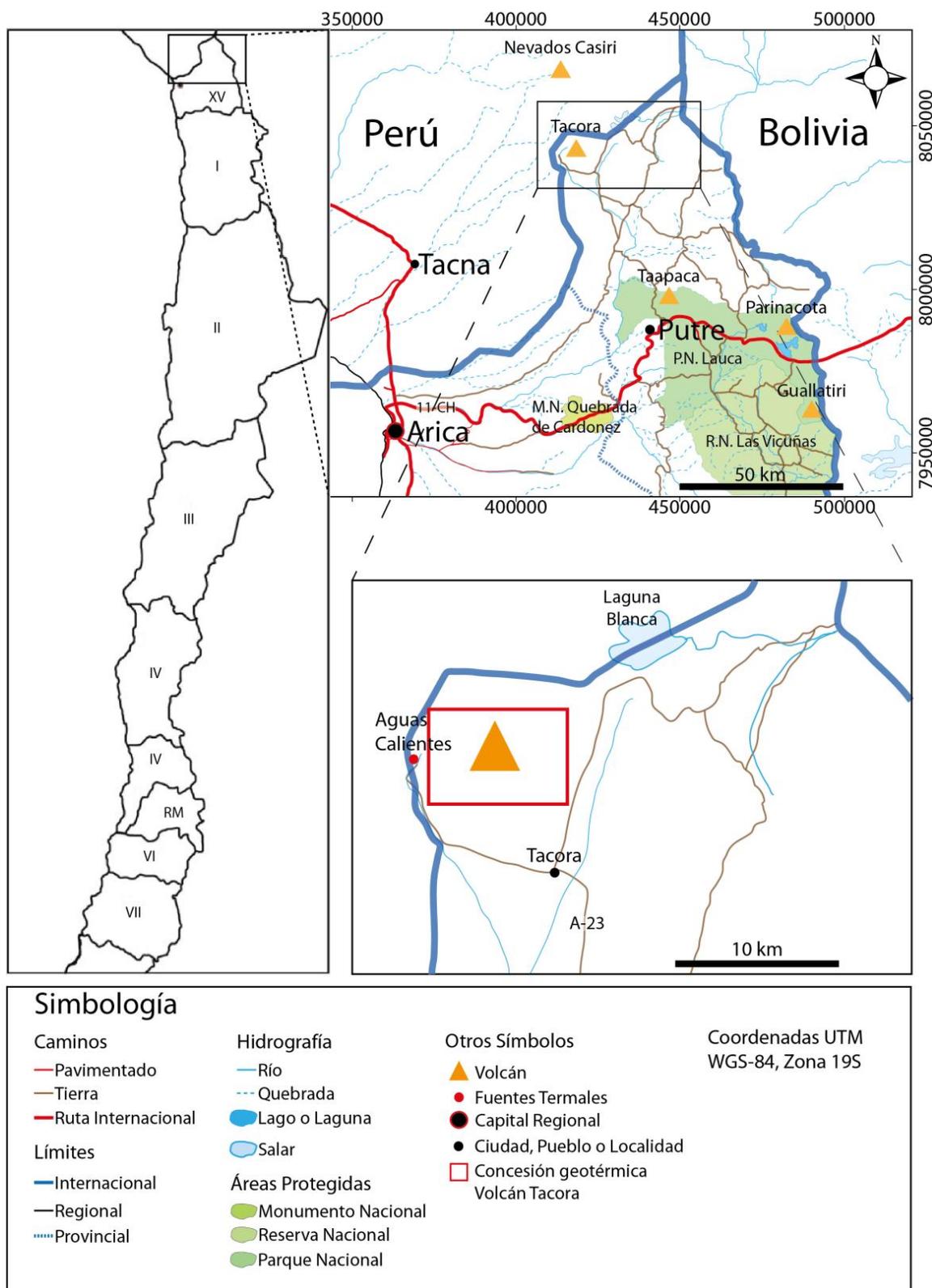


Figura 1-1. Mapa de ubicación y vías de acceso del área de estudio. Se destaca en el recuadro rojo la ubicación de la concesión geotérmica Volcán Tacora. Se identifican las vías de acceso: ruta internacional Libertador José de San Martín, 11-CH (rojo) y la ruta A-23 (marrón).

1.6. Metodología de trabajo

La metodología utilizada para abordar este trabajo consistió en una serie de etapas, las cuales correspondieron a: trabajo de gabinete (pre-terreno), trabajo de terreno y trabajo de laboratorio. A continuación se describen las actividades desarrolladas en cada uno de estas etapas.

1.6.1. Trabajo de gabinete

Se desarrolló un análisis de imágenes satelitales con el objeto de hacer una caracterización mineralógica preliminar de las zonas de alteración hidrotermal identificadas en la zona de estudio.

1.6.1.1. Metodología de análisis de imágenes satelitales

Para llevar a cabo este análisis se utilizaron imágenes satelitales tipo ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), las cuales comprenden 14 bandas con diferente longitud de onda, abarcando desde el verde visible al infrarrojo térmico (0,52-11,65 μm). Estas bandas son agrupadas en tres subsistemas (VNIR, SWIR y TIR), cada uno con una resolución espacial de 15, 30 y 90 metros por pixel respectivamente (Figura 1-2). Para trabajar con este tipo de imágenes se utilizará la plataforma ENVI 4.5.

La identificación de la alteración hidrotermal se llevará a cabo utilizando la metodología de los árboles de decisión (Lattus, 2011). Esta metodología está basada en un nodo de decisión al cual se le asigna un criterio o condición. De esta manera este nodo de decisión analizará todos los píxeles pertenecientes a la imagen, generando dos clases. Una clase está compuesta por aquellos píxeles que cumplen con la condición, y la otra está compuesta por aquellos píxeles que no la cumplen. Así se puede tener cuantos nodos de decisión se quiera, de manera de construir un árbol de decisión.

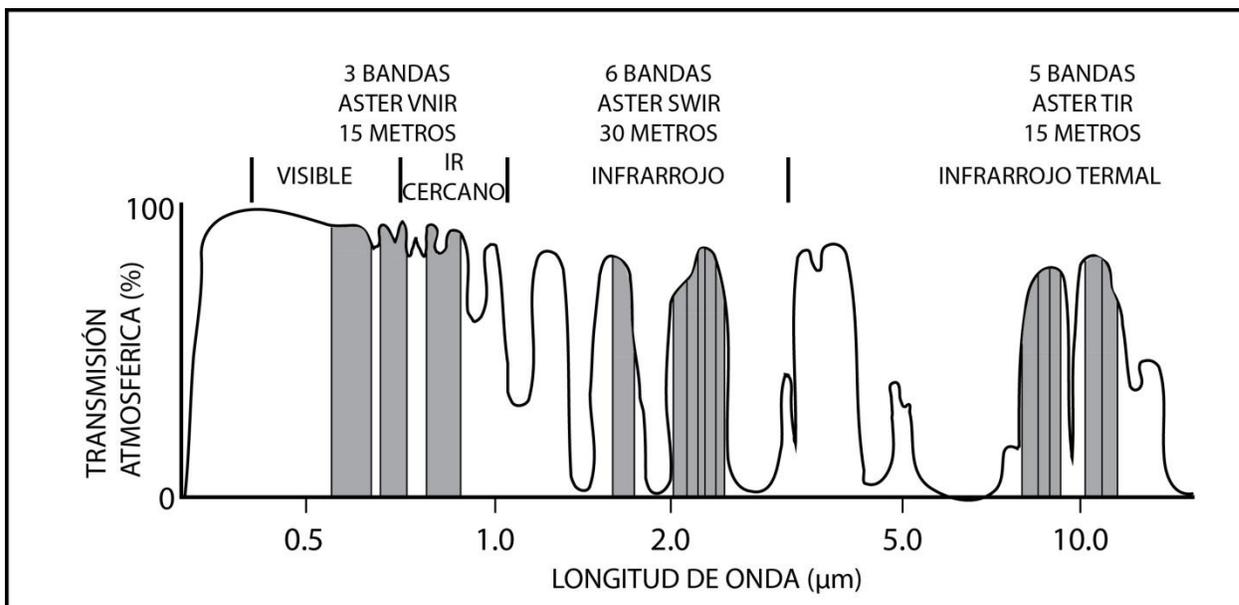


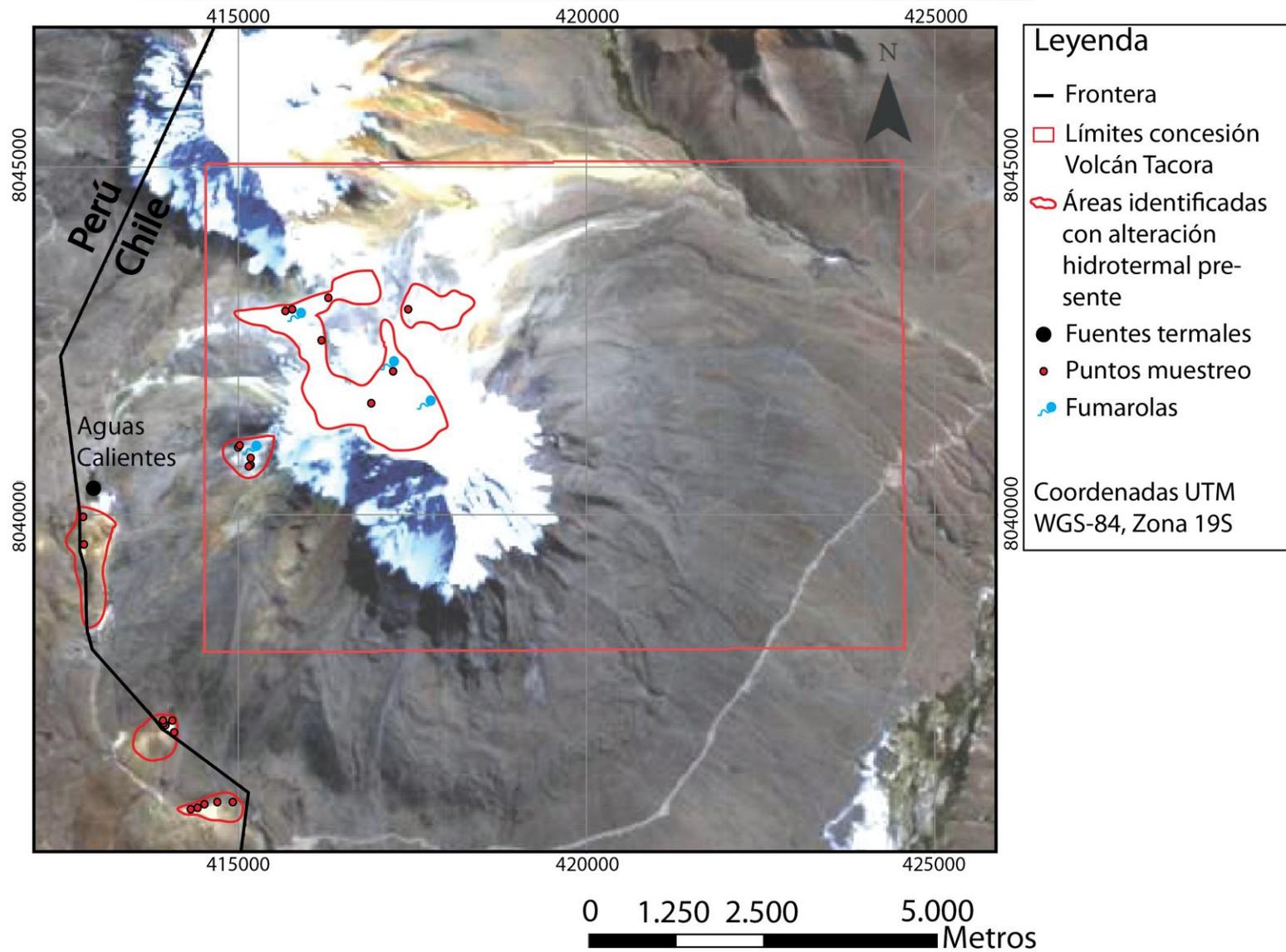
Figura 1-2. Espectro de transmisión atmosférica, donde destaca, en bandas grises, las bandas espectrales que utilizan las imágenes ASTER. Modificado de Rowan y Hook (2003).

En este análisis se construirá un árbol de decisión basado en los patrones de reflectancia característicos que presentan minerales tales como alunita, clorita, jarosita, caolinita y pirofilita. La elección de caolinita y jarosita se debe a que son minerales comúnmente asociados a alteración argílica (o argílica intermedia), y también pueden presentarse como resultado de una alteración, de origen superficial de rocas volcánicas. Por otro lado la presencia de alunita y pirofilita indica la presencia de una alteración hidrotermal de tipo argílica avanzada. Finalmente la clorita es un mineral característico de una alteración hidrotermal de tipo propilítica. De esta manera, mediante la aplicación de este análisis sobre las imágenes satelitales de la zona de estudio, se espera obtener un mapa en el cual se visualice la distribución de zonas de alteración hidrotermal argílica intermedia, argílica avanzada y propilítica.

1.6.2. Trabajo de terreno

Se realizaron dos campañas de terreno de siete días cada una, realizándose muestreo de roca en las zonas de alteración hidrotermal identificadas. Estas zonas se ubican tanto dentro como fuera del área de concesión Volcán Tacora. Las primeras comprenden los campos de fumarolas Norte y Oeste, y el sector del cráter, ubicado en lo alto del edificio volcánico. Por otro lado, las zonas ubicadas fuera de la concesión corresponden a afloramientos de rocas ubicados en la base de la ladera Oeste, a lo largo de la frontera Chile-Perú. Considerando esta situación, se eligieron puntos de muestreo en territorio chileno y peruano. A continuación se muestra la distribución de las zonas de alteración hidrotermal identificadas y los puntos de muestreo efectuados (Figura 1-3). La ubicación de los puntos se encuentra en adjuntado en la sección Anexos.

Figura 1-3. Mapa de distribución de las zonas de alteración hidrotermal identificadas y los puntos de muestreo efectuados durante el trabajo de terreno.



1.6.2.1. Metodología de muestreo

En el caso de Volcán Tacora, se tomaron muestras a partir de bloques de roca. Por otro lado, en el caso de las zonas de alteración ubicadas hacia el Oeste de la concesión, se obtuvieron muestras de roca directamente a partir de los afloramientos identificados. Así finalmente se obtuvo un total de 57 muestras de roca.

1.6.3. Trabajo de laboratorio

Se realizó la descripción de la mineralogía de alteración presente en las muestras tomadas en terreno. A continuación se detalla la metodología utilizada para dicha descripción.

1.6.3.1. Metodología de descripción mineralógica

1.6.3.1.1. Caracterización macroscópica

Se hizo una descripción a escala macroscópica de todas las muestras recolectadas, identificando el tipo de roca, estructuras, minerales y sus respectivas texturas. Esto se llevó a cabo en el laboratorio de rocas del Departamento de Geología.

1.6.3.1.2. Microscopía óptica

Posteriormente y basándose en la similitud entre algunas de las muestras, del total de muestras obtenidas se confeccionaron cortes transparentes a un número de 30 muestras. Esta tarea fue encomendada al taller de cortes del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Luego, los cortes fueron descritos en el laboratorio de microscopios del mismo Departamento.

1.6.3.1.3. Métodos analíticos: Difracción de rayos X

Sobre la base del importante porcentaje de fracción fina presente en un número considerable de muestras, y con el objeto de identificar las fases minerales presentes en dicha fracción, se realizó un análisis de difracción de rayos X utilizando el método del polvo, sobre un número total de 9 muestras.

De esta manera se realizó una preparación previa de las muestras, la cual consistió en moler las muestras hasta que el material sea lo suficientemente fino tal que pasara la malla #200. Esta tarea se llevó a cabo en el laboratorio de preparación de muestras del Departamento de Geología. Luego, para cada muestra se tomaron entre 1-3 cm³ de polvo cristalino, el cual fue dispuesto en un porta-muestra y posteriormente analizado en un difractómetro de rayos X, ubicado en las dependencias del Departamento de Física de la Universidad de Chile.

1.7. Hipótesis de trabajo

El área de volcán Tacora constituye un posible sistema geotermal. El volcanismo activo, evidenciado por la presencia de éste y otros centros eruptivos ubicados alrededor, y la existencia de manifestaciones superficiales y zonas de alteración hidrotermal identificadas en la zona de estudio, constituyen condiciones geológicas favorables para la existencia de un reservorio geotermal. En particular se postula que la naturaleza y distribución de las zonas de alteración hidrotermal permiten generar un modelo conceptual de distribución superficial de las zonas de alteración hidrotermal y establecer las características químicas en superficie del posible sistema geotermal.

1.8. Alteración hidrotermal en campos geotermales activos

1.8.1. Introducción

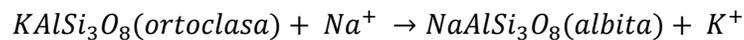
La alteración hidrotermal es un término que involucra los cambios mineralógicos, texturales y químicos que sufren las rocas producto de su interacción con fluidos hidrotermales que fluyen a través de éstas. Su estudio ha sido de gran importancia para el desarrollo de la exploración de depósitos minerales y campos geotermales.

1.8.2. Procesos de alteración hidrotermal

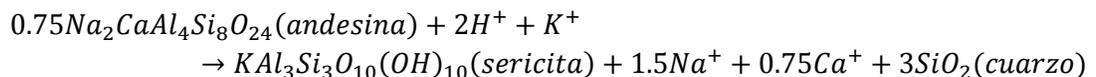
Respecto a los cambios mineralógicos ocurridos, al interior de los campos geotermales, producto de la interacción fluido-roca, éstos pueden ser generados por distintos procesos, entre los que destacan:

- **Precipitación directa:** Este proceso consiste en que los minerales precipitan directamente a partir de los fluidos hidrotermales. Este fenómeno está controlado por la permeabilidad de las rocas y la solubilidad de los minerales en el fluido hidrotermal. Es común que este proceso ocurra en niveles permeables (e.g. rocas del reservorio).

- **Lixiviación:** Esto ocurre cuando fluidos hidrotermales ácidos atacan químicamente la roca generando como resultado la disolución de aquellos minerales que no son estables bajo las condiciones físico-químicas de los fluidos. Debido a este proceso ocurre un incremento de la permeabilidad de las rocas alteradas.
- **Reemplazo:** Cuando aquellos minerales primarios no son estables bajo las nuevas condiciones físico-químicas, entonces puede ocurrir un proceso de reemplazo de éstos por nuevos minerales los cuales serán estables bajo las nuevas condiciones. La ocurrencia de este proceso está controlada en parte por la permeabilidad de las rocas (Browne, 1984).
- **Intercambio iónico:** Corresponde a reacciones que involucran un intercambio iónico entre los fluidos hidrotermales y el mineral. Un ejemplo de este intercambio iónico consiste en el intercambio de cationes que se produce en la reacción de conversión de ortoclasa a albita:



Otro ejemplo corresponde a dichas reacciones que involucran el consumo de H₂O durante la interacción de los fluidos hidrotermales con minerales silicatados (Hidrólisis). Estas reacciones están involucradas en la alteración de feldespatos (plagioclasas) a mica potásica:



La ocurrencia de éste y el resto de los procesos anteriormente mencionados generan cambios en la composición química de las rocas y fluidos hidrotermales. En el caso de éstos últimos, dichos cambios afectan al pH y la actividad de solutos disueltos en la solución (Pirajno, 2009).

1.8.3. Factores de la alteración hidrotermal

En base al estudio de la mineralogía de alteración encontrada en una serie de campos geotermales, Browne (1984) establece que la alteración hidrotermal está controlada por una serie de factores, entre los que se destacan: el tipo de roca, la temperatura del fluido, presión confinante, permeabilidad de la roca, duración y edad de la actividad hidrotermal, y la composición del fluido hidrotermal. A continuación nos referiremos a este último factor y su relación con la alteración hidrotermal.

1.8.4. Composición de los fluidos geotermales y su relación con la alteración hidrotermal.

La composición de los fluidos hidrotermales se define por la concentración de aniones (e.g. Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-}), cationes (e.g. Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y solutos neutros (e.g. SiO_2 , NH_3) en la fase líquida; el contenido de gases disueltos en la fase líquida (e.g. H_2S , CO_2); la proporción líquido-vapor y el valor de pH de la solución. Dichas características tienen efecto sobre la naturaleza de la alteración hidrotermal ya sea como productos de alteración o como minerales precipitados directamente a partir de los fluidos (Browne, 1984, 1991; Reyes, 1990).

Nicholson (1993) compila los distintos tipos de aguas termales, sus características químicas distintivas, su ocurrencia, manifestaciones superficiales y el tipo de alteración hidrotermal comúnmente asociada a dichos fluidos. De esta manera se establece una relación entre las características químicas de las aguas geotermales y la mineralogía de alteración. Así generalmente, se tiene que aquellos fluidos hidrotermales de carácter cercanamente neutro (pH entre 6-8), generan una alteración hidrotermal de tipo propilítica, y en algunos casos de tipo argílica. Por otro lado aquellos fluidos de carácter ácido (pH < 6), generan una alteración hidrotermal de tipo argílica a argílica avanzada (Tabla 1).

1.9. Modelo conceptual de un sistema geotermal

Nicholson (1993) establece un modelo conceptual enfocado en aquellos sistemas geotermales con características de un recurso geotermal dominado por una fase líquida de alta temperatura y cuya fuente de calor de origen magmática, relacionada a un volcanismo reciente. Dicha fuente calor se ubica generalmente a una profundidad de unos 8 km o más. La estructura hidrológica consiste en un ciclo en que las aguas meteóricas penetran en la superficie, a través de estructuras y zonas permeables, alcanzando profundidades de 5 a 7 km. A medida que descienden, éstas son calentadas y reaccionan con la roca circundante, y se produce una incorporación de solutos al fluido geotermal. Entonces por convección se produce un ascenso de éstos fluidos que inicialmente son de tipo clorurados. Luego los fluidos son retenidos en un horizonte permeable formando un reservorio geotermal donde se alcanza el equilibrio fluido-roca. A medida que estas aguas cloruradas ascienden a la superficie se produce la ebullición, generándose una zona de dos fases (fase líquida y gaseosa). Estas aguas cloruradas residuales pueden ser descargadas en superficie como manantiales calientes en la zona de “*upflow*” o viajar en un flujo lateral y ser descargadas a kilómetros de distancia (“*outflow*”). Los gases generados en la zona de ebullición emergen a la superficie y son descargados en superficie como fumarolas. De manera alternativa, éstos pueden disolverse en aguas meteóricas o condensarse en un acuífero colgado para así dar origen a aguas sulfatadas-ácidas y/o bicarbonatadas (Figura 1-4).

Tabla 1. Tipos de aguas geotermales, su ocurrencia, características químicas, manifestaciones superficiales y tipo de alteración asociadas. Tomado de Nicholson (1993).

Tipo de Aguas	Ocurrencia	Características químicas	Manifestaciones superficiales	Tipo de alteración
Aguas cloruradas (o cloruradas-neutras)	Típicas de fluidos geotermales profundos provenientes directamente del reservorio. Se encuentran en la mayoría de los sistemas geotermales de alta temperatura.	Predominancia del anión Cl con concentraciones del orden de los miles de mg/kg. Concentraciones variables de SO_4 y HCO_3 . El pH es cercanamente neutro. Especies gaseosas comunes son CO_2 y H_2S (Marini, 2000).	Generalmente son descargadas desde manantiales calientes y piscinas de alto flujo de emisión, además de géiseres.	Propilítica-Argílica. Los minerales característicos son: fases silíceas (ópalo, cristobalita, cuarzo), albita, adularia, illita, clorita, epidota, zeolitas, calcita, piritita, pirrotina. En superficie puede darse la ocurrencia de depósitos tipo sinter silíceos e incluso depósitos travertinos.
Aguas sulfatadas (o sulfatadas-ácidas)	Originadas por la condensación de gases geotermales en aguas subterráneas oxigenadas cercanas a la superficie. Se encuentran en los márgenes de los campos geotermales, en acuíferos colgados y sobre la zona de ebullición.	Predominancia del anión SO_4, proveniente de la oxidación del H_2S . Dicha reacción disminuye el pH, creando aguas ácidas. Cantidades traza de Cl, el HCO_3 se presenta en muy bajas concentraciones o ausente (Marini, 2000). Las especies gaseosas NH_3 , As y B son posibles de encontrar en altas concentraciones.	Presentes en piscinas de barro ("mud pools") o manantiales. Junto a éstas pueden presentarse emisiones de gas como fumarolas o suelo humeante ("steaming ground") . Dada la naturaleza ácida de estos fluidos, se genera un debilitamiento de la roca circundante, produciendo que en aquellos campos geotermales de alto relieve se produzcan deslizamientos de roca.	Argílica-argílica avanzada e incluso silicificación. Los minerales característicos son: azufre nativo, alunita, jarosita, anhidrita, piritita, pirrotina, hematita, goethita, y fases silíceas (ópalo y cristobalita). También es posible encontrar halloysita, caolinita, dickita, pirofilita y esmectita.
Aguas bicarbonatadas (o aguas bicarbonatadas-sulfatadas-neutras)	Originadas por la condensación de una fase gaseosa en aguas subterráneas pobremente oxigenadas. Suelen presentarse en los márgenes y en parte superior del sistema geotermal, en la zona de condensación.	Caracterizadas por presentar un pH cercano a neutro, y sus constituyentes principales son el HCO_3 y el Na. El SO_4 puede presentarse en cantidades variables, mientras que el componente Cl puede estar en muy bajas concentraciones o ausente.	Generalmente son emitidas desde manantiales o vertientes frías, tibias y calientes.	Argílica. Presencia de minerales tales como arcillas (caolinita, montmorillonita), calcita e incluso puede presentarse silicificación. En torno a las manifestaciones superficiales es posible el desarrollo de grandes depósitos de travertinos.

<p>Aguas sulfatadas-cloruradas</p>	<p>Existen diversos procesos que originan este tipo de aguas: a) Mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas en profundidad. b) Descarga cercana a la superficie y oxidación de H₂S en aguas cloruradas. c) Condensación cercana a la superficie de gases volcánicos en aguas meteóricas. d) Condensación de gases volcánicos en profundidad. e) Paso de fluidos clorurados a través de secuencias ricas en sulfatos (evaporíticas). De todos los procesos mencionados, el proceso a) parece ser el más probable. Estas aguas ocurren en lagos cratéricos, donde ocurren importantes influjos y absorción de gases volcánicos, tales como HCl, y SO₂.</p>	<p>Pueden presentar un pH en el rango de 2-5, con proporciones similares de Cl y SO₄. En ocasiones el pH puede presentar valores entre 0 y 2, aunque la neutralización por interacción agua-roca, especialmente en el caso del proceso d) donde hay más tiempo para la ocurrencia de estas reacciones, puede aumentar el valor del pH y así, enmascarar esta característica.</p>	<p>Generalmente emitidas desde manantiales o vertientes tibias a calientes.</p>	<p>Una mezcla de propilítica y argílica avanzada. Minerales característicos son: silíce amorfa (ópalo), cristobalita, tridimita, caolinita, pirofilita, esmectita, alunita, anhidrita, azufre nativo, clorita, calcita, adularia, goethita y hematita. Se pueden presentar depósitos tipo sinter con sulfatos.</p>
<p>Aguas cloruradas-(bicarbonatadas)-diluidas</p>	<p>Proviene de la dilución de aguas cloruradas en aguas subterráneas o bicarbonatadas durante el flujo lateral. Probablemente están restringidas a los márgenes de las zonas de "upflow" y estructuras de "outflow" en sistemas de alta temperatura.</p>	<p>Caracterizadas por tener un pH cercanamente neutro, con valores entre 6-8, cuyo anión predominante es el Cl, con HCO₃ presente en concentraciones variables.</p>	<p>A menudo son descargadas a la superficie desde manantiales o vertientes tibias presentes en sistemas de baja temperatura.</p>	<p>Propilítica-Argílica. Se presenta una mineralogía de alteración similar a la asociada a las aguas cloruradas, pero con la particularidad que se presenta con un pobre desarrollo.</p>

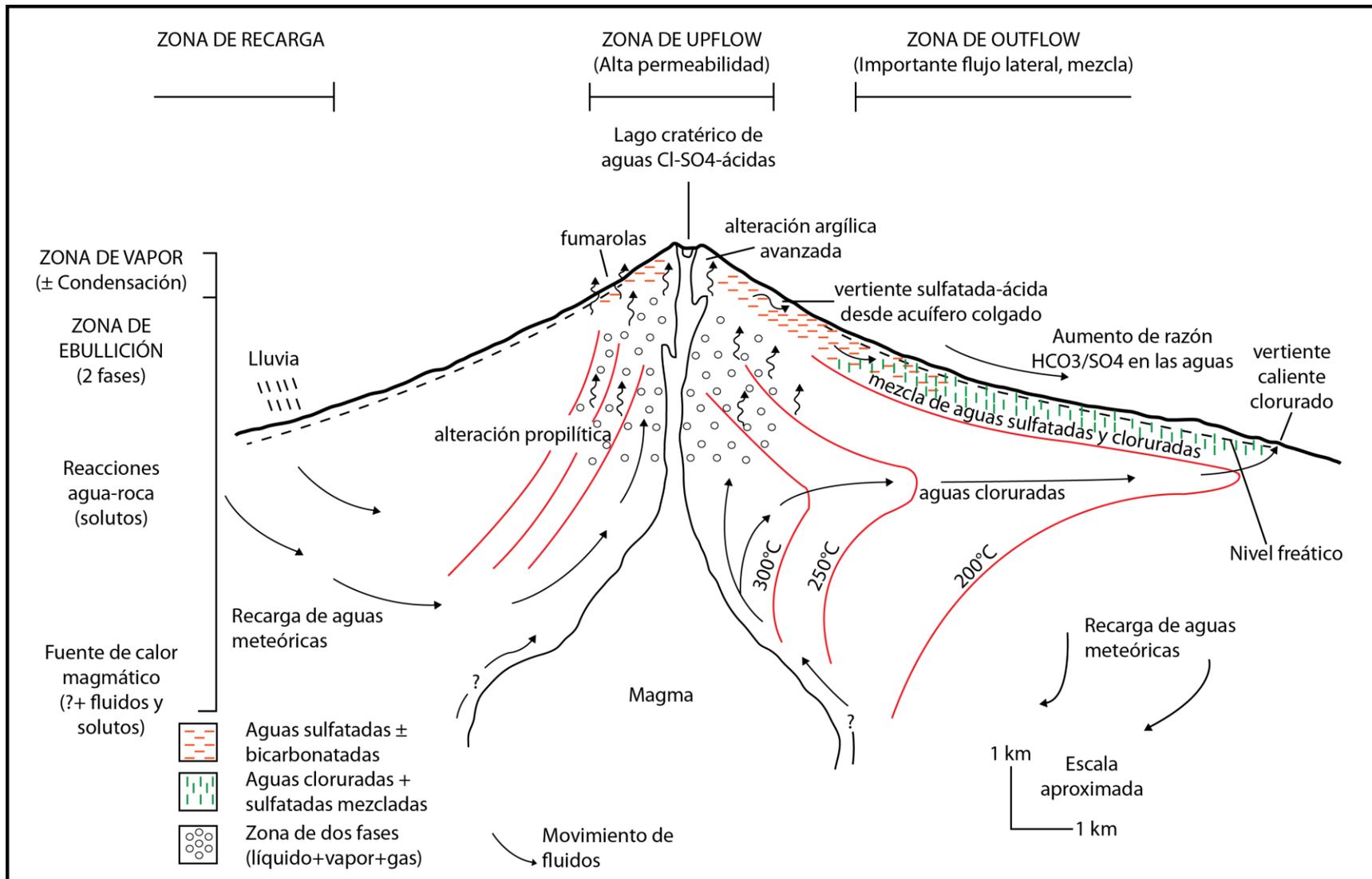


Figura 1-4. Modelo conceptual de un sistema geotermal asociado a volcanismo activo destacándose la naturaleza y distribución de manifestaciones superficiales y aguas geotermales. Además se indica la fuente de calor, estructura termal, hidrología y los procesos ocurridos al interior del sistema geotermal. Modificado de Nicholson (1993).

2. Marco geológico de la zona de estudio

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta la información geológica regional con énfasis en el volcanismo para luego identificar, a escala local, las características geológicas de la zona de estudio.

2.2. Marco geológico regional

Los Andes constituyen un ejemplo de volcanismo asociado a un margen convergente de placas litosféricas. En el borde occidental de Sudamérica existe una convergencia de la placa oceánica de Nazca y la placa continental Sudamericana. Producto de esta convergencia se genera la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, proceso que estaría ocurriendo desde el Jurásico Inferior (ciclo andino, Charrier et al., 2007). Esta configuración traerá como consecuencia una modificación del relieve de la placa Sudamericana a través de la ocurrencia de eventos volcánicos y tectónicos a lo largo del margen continental durante la orogénesis andina.

2.2.1. Volcanismo y tectónica en Los Andes

Con respecto al volcanismo, los Andes han sido separados en cuatro segmentos denominados como zonas volcánicas: Norte (ZVN; 2°N-5°S), Central (ZVC; 14°-27°S), Sur (33°-46°S) y Austral (ZVA; 49°-55°S) (Figura 2-1). Esta segmentación se basa en los cambios en la profundidad de la zona de Wadati-Benioff (placa de Nazca) a lo largo del margen Oeste de Sudamérica (Jordan et al., 1983), haciendo que existan zonas sin presencia de volcanismo Cuaternario (e.g. tramo entre los 28°-33°S) producto de un bajo ángulo de subducción (10°), comparado con las zonas con volcanismo activo, donde el ángulo es mayor (30°, Gutscher, 2002). Estos cambios de ángulo de subducción se han atribuido a la subducción de los *ridges* de Nazca, Juan Fernández y de Chile, ordenados según su ubicación de Norte a Sur. Estas estructuras serían más jóvenes, con un menor grado de enfriamiento, por lo tanto serían menos densas que el resto de la corteza oceánica. Esto generaría una variación en el acoplamiento de las placas, disminuyendo el ángulo de subducción (Jordan et al., 1983).

La zona de estudio donde se emplaza el volcán Tacora se encuentra dentro de la zona volcánica central (ZVC), la cual a su vez ha sido subdividida en dos segmentos, uno con orientación NO-SE y otro con orientación N-S (de Silva & Francis, 1991). La ZVC presenta una extensión aproximada de unos 1500 km y comprende 44 volcanes activos, 18 centros activos y al menos 6 centros

ignimbríticos o sistemas de caldera de edad cuaternaria (de Silva & Francis, 1991; Stern, 2004), abarcando desde el centro volcánico Coropuna-Solimana, Perú (15°S), hasta la cadena volcánica Tres Cruces-Nevaldo Ojos del Salado (27°S) (González-Ferrán, 1985). Toda la ZVC se encuentra limitada en el Norte por la el flat slab peruano, asociado al *ridge* de Nazca(5°-14°S), y en el Sur por el flat slab Pampeano, asociado al *ridge* de Juan Fernandez (27°-33°S) (Stern, 2004) (Figura 2-1).

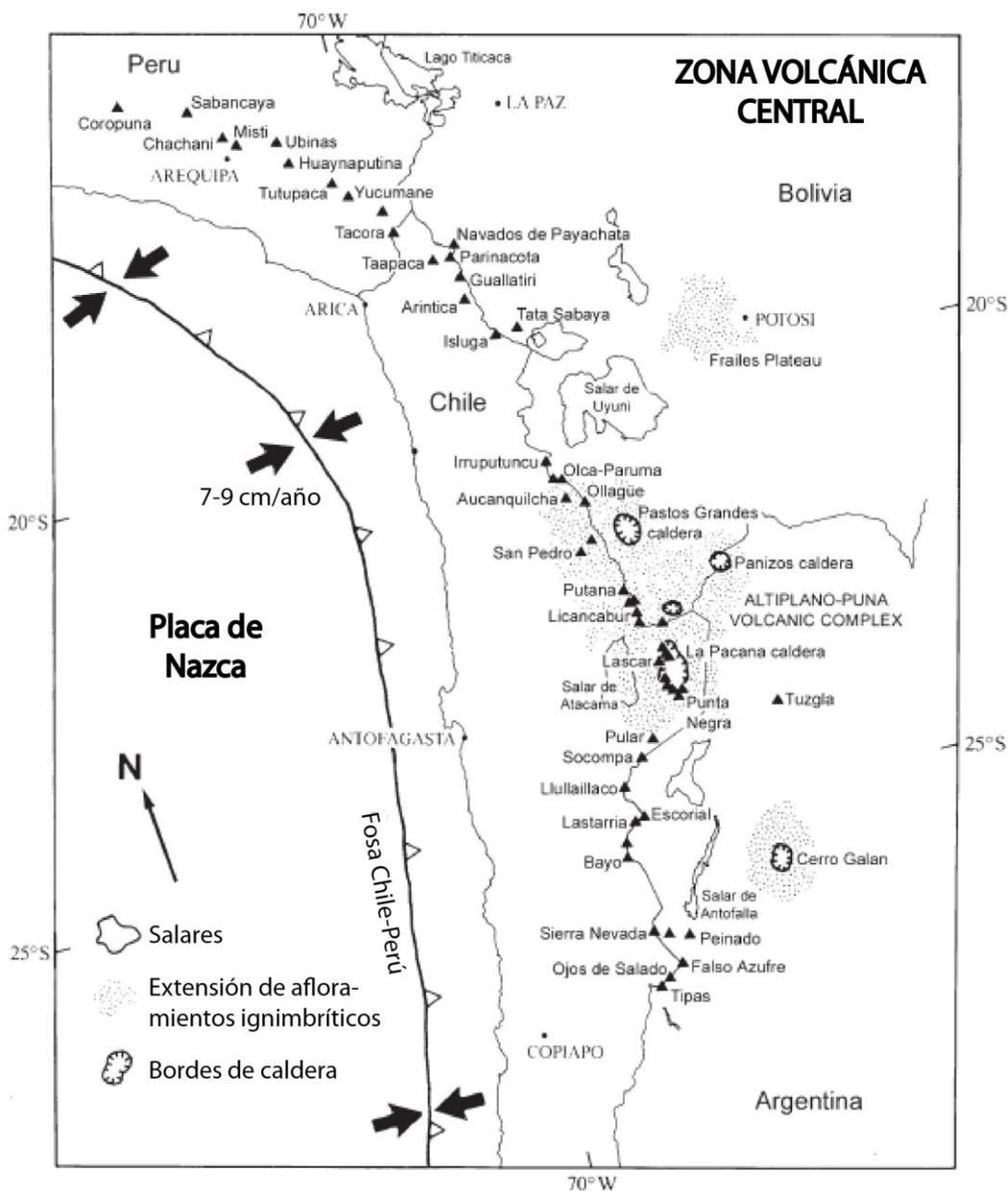


Figura 2-1. Zona volcánica central (ZVC) de Los Andes. En ésta se destaca la ubicación de algunos volcanes, y centros ignimbríticos que la componen. Además se señala el borde convergente de placas y su velocidad anual de convergencia. Modificado de Stern (2004).

Con respecto a la subducción que ocurre en la ZVC, la placa de Nazca está siendo subductada con un ángulo que, actualmente, se ha establecido entre 25° (Dorbath et al., 1996) y 30° (Gutscher, 2002) a una tasa de 7-9 cm/año (Dorbath et al., 1996), y con una dirección de convergencia que varía con la latitud, teniendo una orientación de 20-24° hacia el SE, con respecto a la ortogonal de la fosa Chile-Perú, en el Sur del Perú; 0° (ortogonal) en la latitud de Arica; y de 27° hacia el NE, en el Norte de Chile (Dorbath et al., 1996). Esta variación en la dirección de convergencia es un reflejo de la variación en la geometría del margen continental en función de la latitud, cuya orientación es NO-SE en el Norte de la ZVC, y con orientación N-S en el Norte de Chile, al Sur de Arica (18°-28°S). Esta configuración de la variación en el ángulo de convergencia, tendrá como consecuencia diferencias en la deformación a lo largo del margen continental, generándose un ambiente de deformación transpresiva sinistral en el segmento norte de la ZVC (e.g. Sistema de Falla Incapuquio-Challaviento, Flores et al., 2005), mientras que el caso del Norte de Chile, las estructuras son principalmente inversas con una componente de rumbo tipo dextral, las cuales han sido identificadas a partir de la Latitud 19°30'S (WTS, Farías et al., 2005). En el caso del Norte de Chile, este sistema de fallas, que se evidencian en la Precordillera, ha sido causante del alzamiento del borde Oeste del Altiplano (Farías et al., 2005), lo cual genera un aporte al engrosamiento de la corteza, que en estas latitudes alcanza aproximadamente los 70 km de espesor.

2.2.2. Unidades morfo-estructurales de Los Andes

Como consecuencia de los eventos volcánicos y tectónicos ocurridos durante la formación de Los Andes se han generado una serie de unidades morfo-estructurales que se disponen de manera paralela al margen continental. Específicamente en la ZVC es posible distinguir, desde Oeste a Este, la Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera y Altiplano. Este último se encuentra limitado por la Cordillera Este y Cordillera Oeste. A lo largo de esta última es donde se ubica la mayoría de los centros volcánicos de edad Pleistocena a Holocena que componen la ZVC (Stern et al., 2007), entre los cuales se encuentra el volcán Tacora (Figura 2-2).

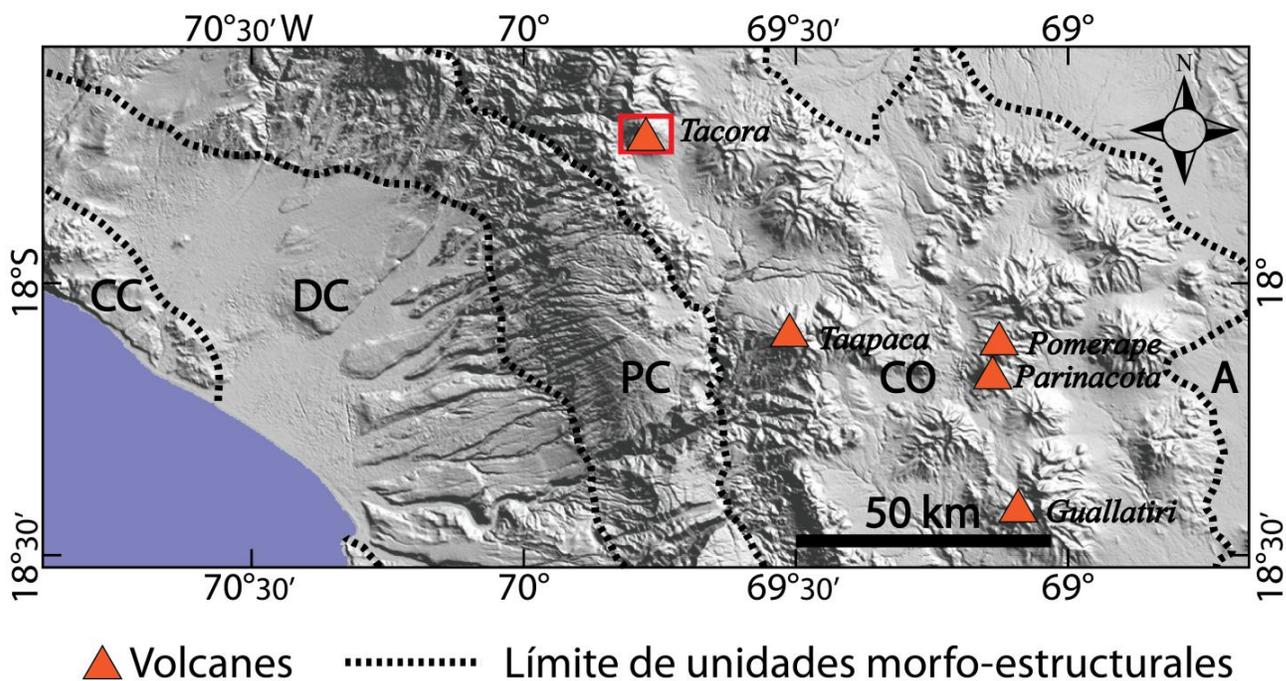


Figura 2-2. Unidades morfo-estructurales de los Andes entre los 18°-18°30' Latitud Sur. Se destaca la presencia de volcanes de edad Pleistocena a Holocena que componen la ZVC. Adicionalmente se destaca en un cuadro rojo la zona de estudio. Abreviaciones: A, Altiplano; CC, Cordillera de la Costa; CO, Cordillera Oeste; DC, Depresión Central; PC, Pre-cordillera.

2.3. Marco geológico local

La geología local está compuesta principalmente por unidades volcánicas, sedimentarias continentales, y una cobertura de depósitos glaciales, coluviales y fluviales (Figura 2-6). En base al trabajo de levantamiento geológico, a escala 1:50000, se definen las siguientes unidades:

2.3.1. Formación Oxaya (Oligoceno Superior - Mioceno Inferior)

Ha sido definida informalmente por Montecinos (1963) como una sucesión volcánica continental, expuesta al este de Arica, y compuesta por tobas ignimbríticas riolíticas, rocas sedimentarias y lavas andesíticas a dacíticas, sub-horizontales a suavemente plegadas. Al oeste de Villa Industrial, tobas riolíticas y rocas sedimentarias habían sido definidas como Formación Lluta (Henríquez, 1963) pero luego se las consideró, por continuidad lateral, como parte de la Formación Oxaya (Salas et al., 1966; Viteri, 1974). En el mismo sector, lavas andesíticas alteradas se incluyeron en la Formación Lupica (Salas et al., 1966) o en la Formación Río Azufre (Viteri, 1974). En este trabajo de memoria se prefiere considerar todas estas rocas como parte de la Formación Oxaya. Las rocas de esta unidad subyacen, en discordancia angular y de erosión, a

los depósitos de la Formación Visviri, y a rocas volcánicas, depósitos fluviales y aluviales del Pleistoceno.

En la zona de estudio, las rocas de esta formación corresponden a lavas andesíticas a dacíticas porfídicas las cuales afloran de manera restringida al Oeste y Suroeste, con un manteo sub-horizontal a ligeramente inclinado hacia el Noroeste, y subyaciendo el flanco occidental del volcán Tacora.

Con respecto a su edad, es posible mencionar que numerosas edades radiométricas K-Ar efectuadas en las tobas de la Formación Oxaya y sus equivalentes han arrojado valores entre $16,9 \pm 0,5$ y $23,7 \pm 0,7$ Ma., pudiendo asignarle una edad Oligoceno Superior-Mioceno Inferior (García et al., 2004). Esta edad permite correlacionarla con la Formación Huaylillas, la cual corresponde a una secuencia volcánica, compuesta principalmente por tobas de composición dacítica a riolítica, que ha sido definida al Sur de Perú y se distribuye entre la Precordillera y la Cordillera Oeste (Mioceno Inferior, Acosta et al., 2011; Charrier et al., 2009).

En las rocas de la Formación Huaylillas se ha identificado la presencia de zonas de alteración hidrotermal, algunas de las cuales tienen un interés económico por su relación con la ocurrencia en depósitos hidrotermales de tipo epitermales de cobre y oro. La ocurrencia de las zonas de alteración hidrotermal sería producto de la actividad hidrotermal asociada al arco volcánico Huaylillas de edad Miocena Inferior (24-10 Ma., Acosta et al., 2011).

2.3.2. Formación Visviri (Plioceno Superior - Pleistoceno Inferior)

Fue definida informalmente por (Henríquez, 1963) como una sucesión sedimentaria continental, sub-horizontal, semi-consolidada, expuesta alrededor de la localidad homónima. Ésta sobreyace en discordancia de erosión a rocas volcánicas del Plioceno, y al sur de la zona de estudio, a la ignimbrita Lauca (García et al., 2004). El techo de la formación es el nivel de erosión actual, el cual se encuentra disecado por quebradas que contienen depósitos sedimentarios asignados al Pleistoceno y Holoceno.

La Formación Visviri aflora extensamente hacia el Sur del área de estudio (Figura 2-6), alcanza una potencia máxima de hasta 100 m de espesor y está compuesta de gravas de grano medio a grueso, areniscas finas a gruesas, y limolitas semi-consolidadas, de colores pardo y gris, con una

selección pobre a moderada, formadas por clastos de diámetro menor a 30 cm, angulosos a sub-redondeados de naturaleza esencialmente volcánica (andesíticas a riolíticas, pómez y escoria).

De acuerdo a relaciones estratigráficas de la Formación Visviri, se le asigna una edad Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior, y se correlaciona estratigráficamente hacia el Sur con la parte superior de la Formación Lauca del Plioceno-Pleistoceno (Muñoz, 1988; Gaupp et al., 1999; García et al., 2004).

2.3.3. Volcán Tacora (Pleistoceno Medio)

Corresponde a un estratovolcán de forma cónica irregular el cual posee un cráter de explosión en el sector Norte donde hay actividad fumarólica así como también en los flancos Noroeste y Oeste. En estos últimos se ha identificado la presencia de zonas de alteración hidrotermal.

En el contexto de volcán Tacora se han identificado dos sub-unidades, una corresponde a lavas de carácter andesítico a dacítico y rocas piroclásticas, y otra correspondiente a un domo dacítico. La primera sub-unidad, la cual posee una mayor extensión dentro del volcán, corresponde a lavas negras a grises porfídicas y afaníticas, de composición andesítica a dacítica, y rocas piroclásticas (Montecinos, 1970). En algunos afloramientos de estas rocas, ubicados en las laderas Oeste y Noreste, se reconocen direcciones de flujo con sentido Oeste y Noreste, respectivamente. Estas lavas cubren en su parte occidental a rocas de la Formación Oxaya. Por otro lado, la segunda sub-unidad consiste en un domo dacítico que se expone restringidamente en la parte centro-norte del volcán (Figura 2-6), y sus rocas poseen una textura porfídica con fenocristales de plagioclasas, sanidina, biotita, anfíbola, y cuarzo en menor cantidad.

Con respecto a la edad de este volcán, de manera general se le ha denominado como un volcán de edad cuaternaria, pero en detalle se tiene una edad K-Ar de $0,489 \pm 0,015$ Ma. (Wörner et al., 2000), lo cual le asigna un edad Pleistoceno Medio. Esto permite correlacionar a esta unidad con las lavas andesíticas del segmento Nevado El Fraile. Este último, junto con el segmento Nevado Barroso, forman el Arco Barroso, el cual corresponde a una gran unidad volcánica compuesta por lavas de composición andesíticas y traquiandesíticas, con niveles de tobas cristalinas-líticas, la cual se ha definido en la Cordillera Occidental al Norte de volcán Tacora. Existe una edad radiométrica K-Ar, de las rocas del segmento Nevado Barroso, de $0,36 \pm 0,01$ Ma. Esto permite asignarle, al Arco Barroso, una edad Pleistoceno Medio (Acosta et al., 2011).

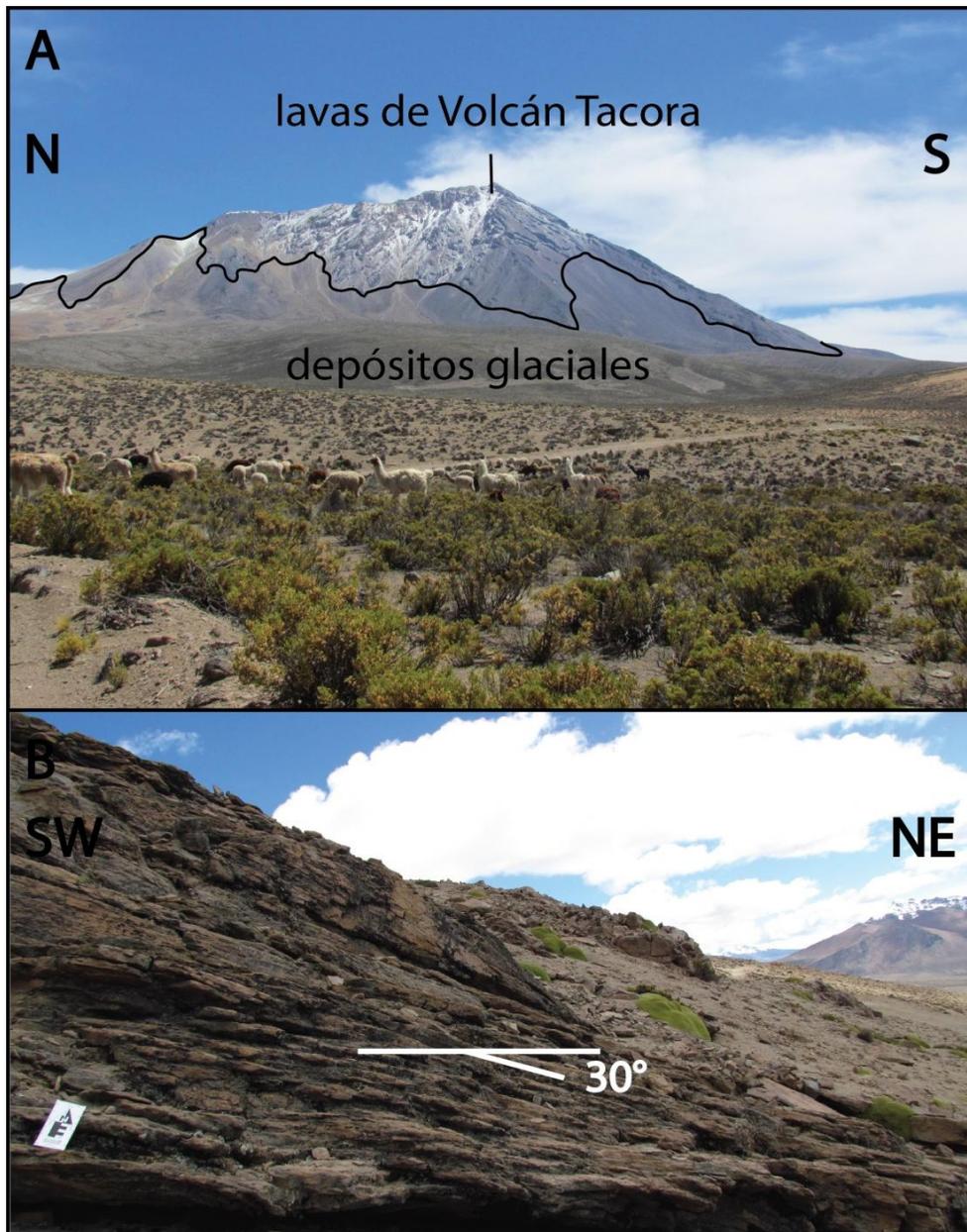


Figura 2-3. Foto de Volcán Tacora. A. con vista al volcán desde el Oeste, se destaca su forma cónica irregular y la presencia de depósitos glaciales en la base. B. en el flanco Noreste se presentan afloramientos de lavas grises las cuales presentan un manteo de aproximadamente 30° hacia el Noreste.

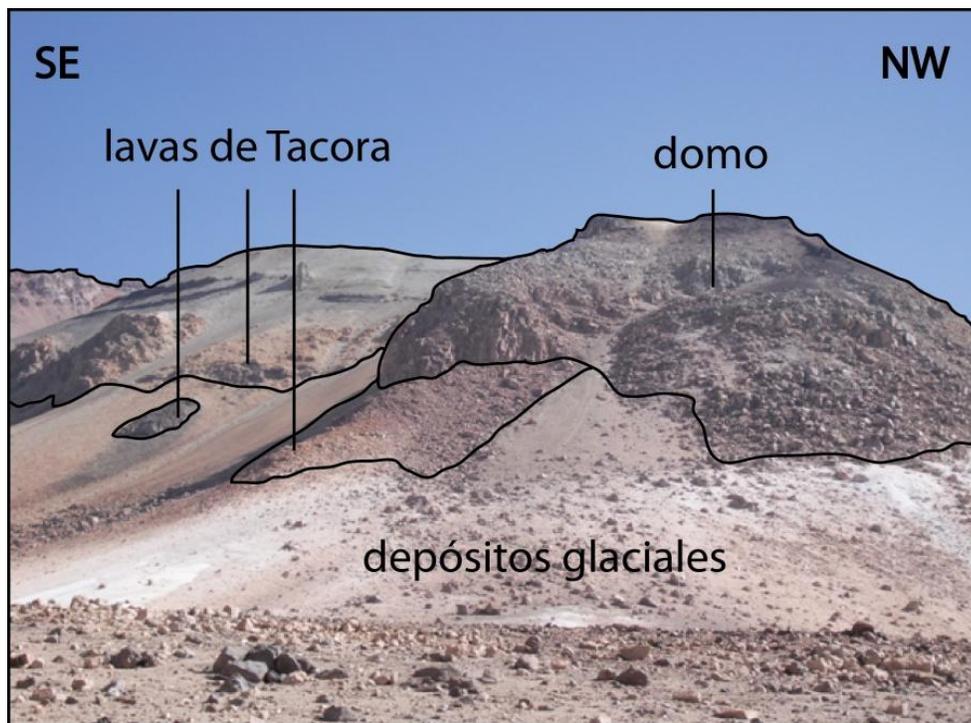


Figura 2-4. Foto de Volcán Tacora, destacándose la presencia del domo dacítico expuesto en el flanco Norte. Junto a éste se identifican las lavas del volcán y los depósitos glaciales ubicados en la base del mismo.

2.3.4. Depósitos glaciales (Pleistoceno Superior)

Estos depósitos corresponden esencialmente a morrenas laterales y/o frontales los cuales se exponen principalmente en los flancos y en la base del edificio volcánico (Figura 2-6). Las morrenas tienen espesores de hasta 200 m y corresponden a depósitos semi-consolidados de muy mala selección compuesta por fragmentos volcánicos (de hasta 2 m de diámetro) angulosos a sub-redondeados y una matriz limo-arenosa. Estos depósitos se asocian a los diversos avances de las últimas glaciaciones en la zona durante el Pleistoceno Superior (Amman et al., 2001).

2.3.5. Depósitos coluviales (Pleistoceno Superior)

Corresponden a depósitos compuestos por arenas limosas y detritos de origen volcánico, inmersos en una matriz limo-arcillosa. Se presentan principalmente en la base de laderas de los centros volcánicos como corrientes de derrubios. En la zona de estudio se ha identificado la presencia de estos depósitos en el sector del cráter, en la ladera Norte bajo un afloramiento de lavas del volcán Tacora y en la ladera Este del cerro Chuquiapiña (Figura 2-6). Debido al contenido de fragmentos pertenecientes a los centros volcánicos, se puede estimar que estos depósitos tienen una edad máxima de Pleistoceno Superior.

2.3.6. Depósitos aluviales y palustres (Holoceno)

Corresponden principalmente a depósitos de limos, arenas y de turbas, subordinadamente gravas finas a medias, no consolidados a semi-consolidados, que se distribuyen en quebradas y depresiones en donde se presentan cubiertos por vegetación de vegas y bofedales. Presentan laminación muy fina, la cual es localmente ondulosa e irregular. Tienen contenidos variables de materia orgánica, ceniza volcánica y detritos volcánicos de tipo andesíticos. A estos depósitos se les asigna una edad Holocena.

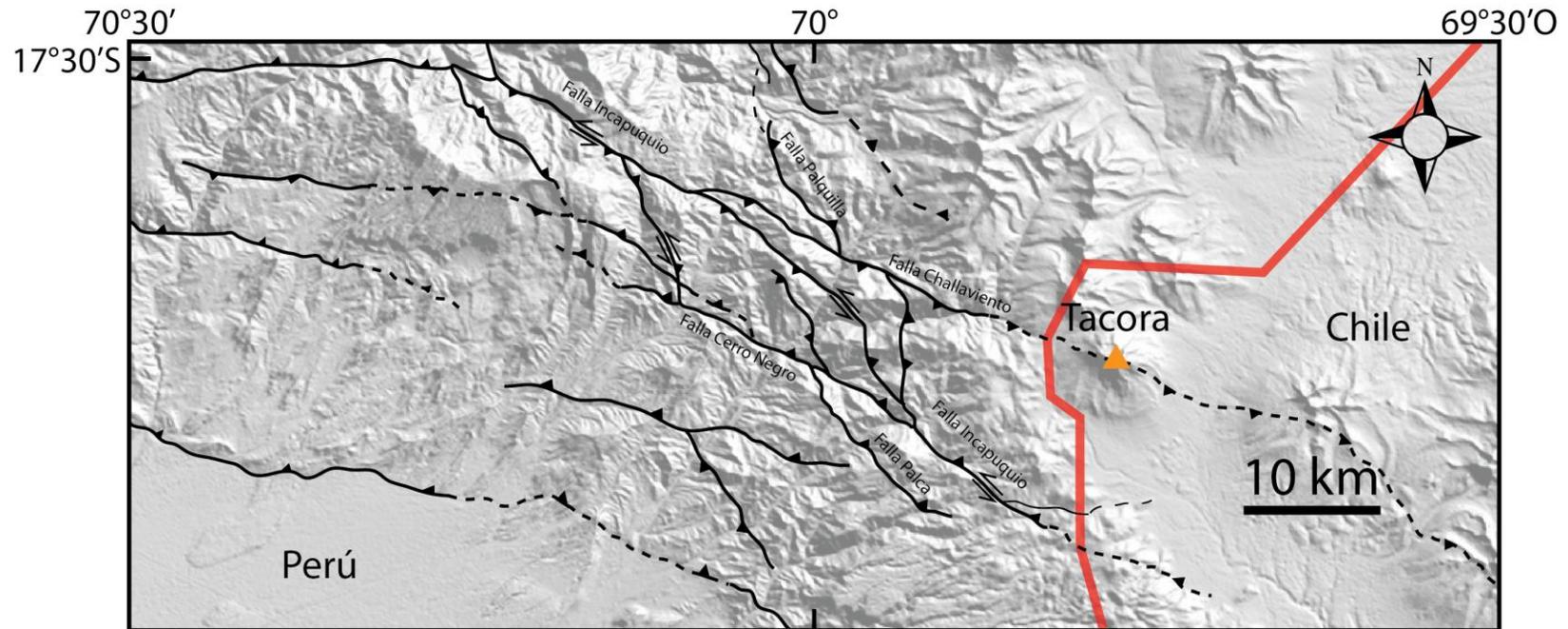
2.4. Geología estructural

En la zona de estudio, a escala local, no se ha observado la presencia de estructuras. Sin embargo, en el Sur de Perú se ha identificado la ocurrencia de un sistema de fallas con orientación NW-SE el cual está compuesto por dos fallas principales de tipo inversa con vergencia opuesta, fallas Incapuquio y Challaviento, y otras fallas menores asociadas (Sistema de Fallas Incapuquio-Challaviento, David et al., 2004). Este sistema de fallas presenta una componente de rumbo de tipo sinistral, el cual se expresa principalmente a lo largo de la falla Incapuquio (Figura 2-5).

A lo largo de este sistema se han observado cabalgamientos de rocas pertenecientes al Paleozoico y Jurásico, sobre rocas del Cretácico y Terciario, así como también la ocurrencia de un batolito de composición granítica a granodiorítica con una edad radiométrica de $40,25 \pm 0,65$ Ma. Este hecho permite acotar la edad del sistema de falla a Eoceno Medio (Super Unidad Challaviento, Acosta et al., 2011). Adicionalmente, la presencia de este sistema de fallas genera un control estructural en la presencia de una serie de depósitos hidrotermales de tipo epitermales de Au-Ag de edad Mioceno-Plioceno que se ubican inmediatamente al Oeste de la Frontera Chile-Perú (e.g. Mina Pucamarca) (Acosta et al., 2011).

Es así como la orientación NW-SE de este sistema de fallas de edad Eoceno Medio (falla Challaviento), coincide con la alineación de centros volcánicos a partir de volcán Tacora hacia el Sureste. De esta manera es posible inferir que este sistema de fallas se podría extender hacia el Sureste sin manifestación superficial en la zona de estudio (Figura 2-5) y posiblemente asociado a este sistema existiría la presencia de un cuerpo intrusivo en profundidad.

Mapa Geología Estructural



Simbología	
Estructuras	Otros
▲▲ Falla Inversa principal	— Frontera
▲▲ Falla Inversa inferida	▲ Volcán
⇐ Falla Sinistral	
— Falla Secundaria	
- - Falla Inferida	

Figura 2-5. Mapa de la geología estructural en el borde Sur de Perú. Se destaca la orientación NW-SE del sistema de fallas Incapuquio-Challaviento (SFIC) y su posible extensión hacia el Sureste pasando por debajo de volcán Tacora (Recopilado de Acosta et al., 2011).

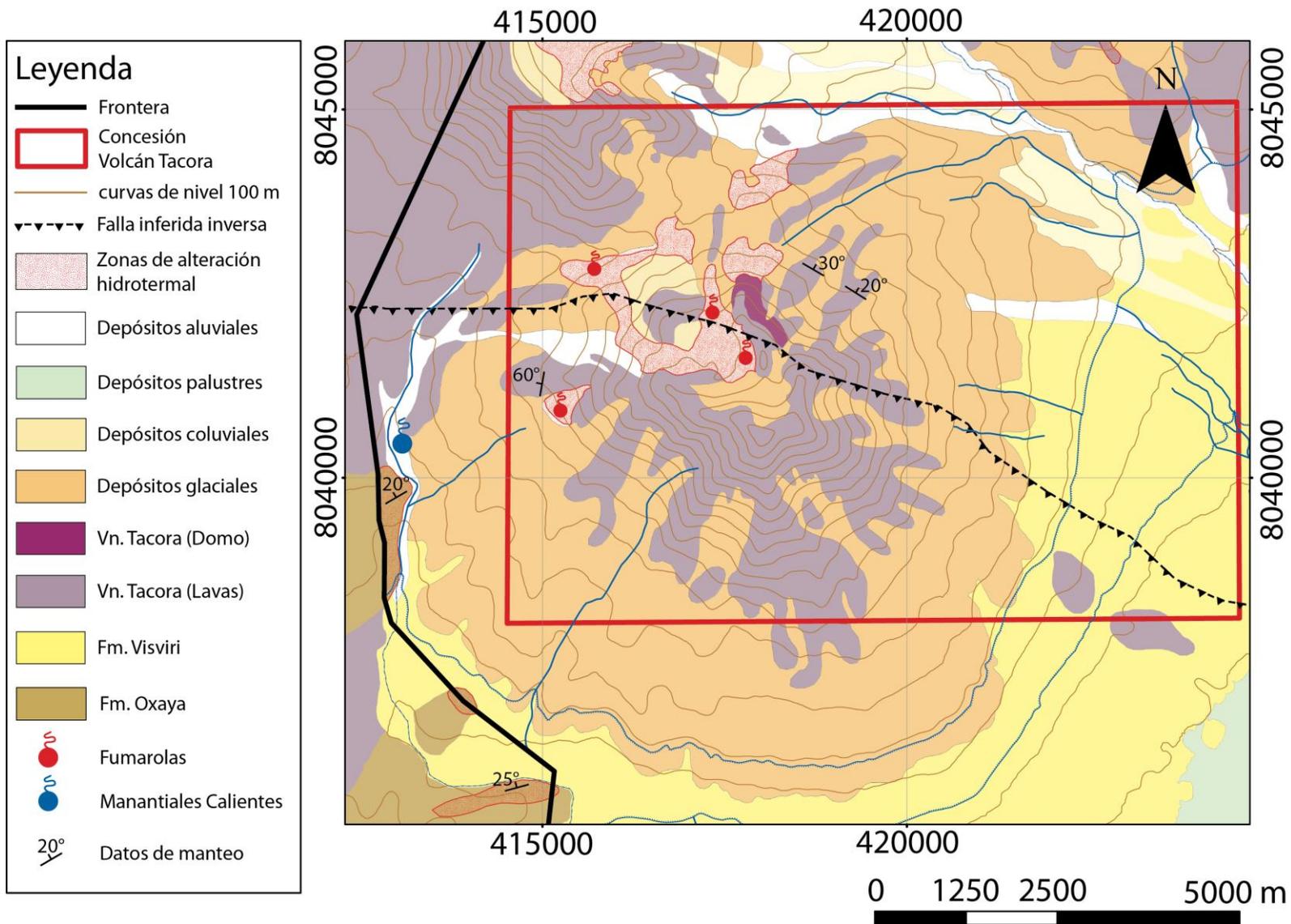


Figura 2-6. Mapa geológico del área de volcán Tacora. Modificado de García (2011).

3. Manifestaciones termales en superficie

Una serie de manifestaciones superficiales se han identificado en la zona de estudio y en sus alrededores. Éstas consisten principalmente en campos de fumarolas y manantiales calientes. A continuación se describe brevemente la información relevante respecto a las características físicas y químicas de dichas descargas.

3.1. Campos de fumarolas

En la zona de estudio se han identificado tres campos de fumarolas (Figura 3-1). Éstos se ubican en la base del flanco Noroeste, en el flanco Oeste, y en el cráter del explosión, siendo el primero el que presenta una mayor extensión. En base al trabajo de terreno se ha verificado que estos campos se desarrollan principalmente sobre los depósitos glaciales y coluviales. Los gases son descargados a través de chimeneas con tamaños variables entre 10 cm hasta 2 metros con abundante presencia de azufre tanto en el interior como en los alrededores inmediatos.

Estas manifestaciones superficiales, principalmente aquellas ubicadas en la base del flanco Noroeste, han sido objeto de estudios geoquímicos (Aguilera, 2008; Capaccioni et al. 2011). Dichos estudios indican que los gases registran bajas temperaturas de descarga, con valores medidos en el rango 82-93°C, y cuya composición química está caracterizada por la presencia de vapor de agua (H₂O), CO₂, bajas cantidades de N₂, H₂S, CH₄, y presencia de volátiles de origen magmáticos tales como SO₂, HF y HCl. La presencia de estos últimos ha sido interpretada como evidencia de un proceso de desgasificación magmática profunda (Capaccioni et al., 2011).

3.2. Manantiales calientes

En la base del flanco Oeste del volcán Tacora, fuera del área de concesión, se encuentra la quebrada que da origen al río Azufre. En esta quebrada se encuentra la localidad de Aguas Calientes (Figura 3-2), lugar donde se ha identificado la presencia de manantiales calientes. Éstos puntos de emisión se desarrollan sobre depósitos fluviales semi-consolidados y bofedales, poseen un diámetro variable entre 1 y 2 metros, y en general presentan caudales bajos a moderados con un valor máximo estimado de 30 l/s. Todos estos puntos de emisión descargan sus aguas al Río Azufre.

Risacher y Hauser (2008) indican que los fluidos descargados presentan temperaturas cercanas a los 40°C y con una composición química caracterizada por un alto contenido de SO₄; además de

Cl, Na, Ca y Mg en menores cantidades; y con valores de pH cercanos a 2. Estas características corresponderían a aguas de tipo sulfatadas-ácidas.

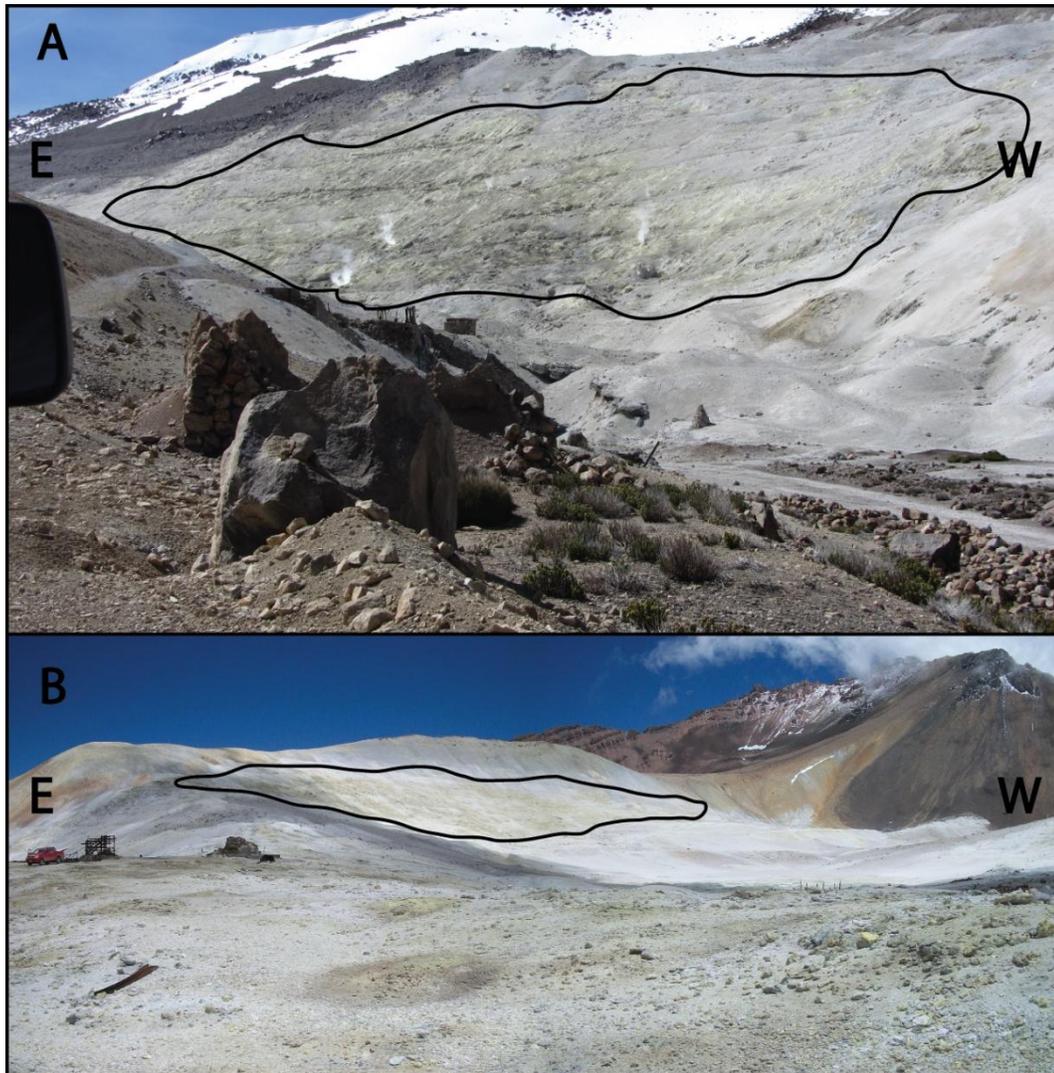


Figura 3-1. Fotos de campo de fumarolas . A. Vista al Sur del campo de fumarolas ubicado en el sector Noroeste de volcán Tacora. La línea negra delimita la extensión de este campo. Los tonos amarillos indican la presencia de azufre nativo. B. Vista panorámica del campo de fumarolas ubicado en el cráter. De manera similar a la foto anterior, se delimita la extensión de este campo.

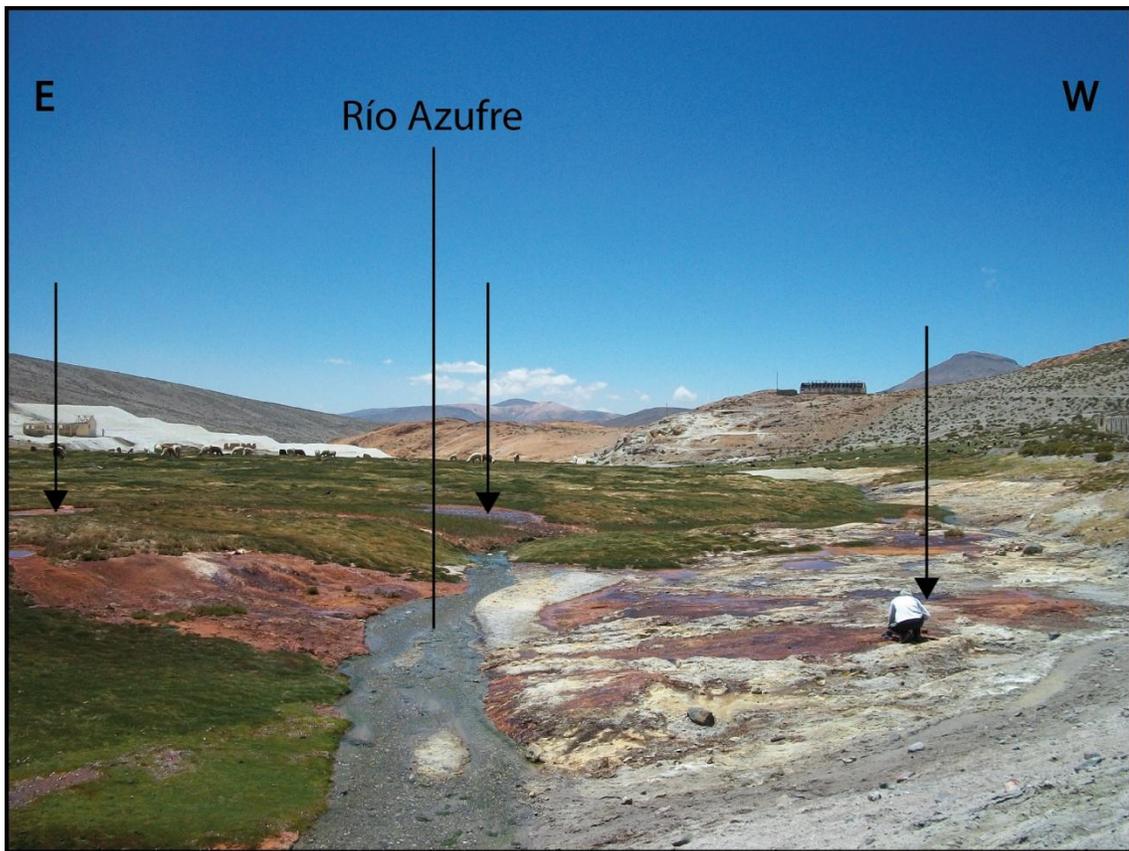


Figura 3-2. Vista al Sur de manantiales en Aguas Calientes. Las flechas indican algunos puntos de emisión localizados en torno al río Azufre. Se destaca el desarrollo de estas manifestaciones sobre depósitos semi-consolidados y vegetación.

4. Resultado del análisis de alteración hidrotermal mediante sensores remotos.

Luego de haber aplicado el análisis de la alteración hidrotermal se ha obtenido un mapa de distribución de la alteración hidrotermal en superficie, representado por la ocurrencia de los minerales de alteración seleccionados en la metodología (Figura 4-1). En éste se observa la presencia de numerosas zonas de alteración que se distribuyen en torno a centros volcánicos, cerros, raramente en bajos topográficos, y de manera extraordinaria en lo que corresponde al salar Laguna Blanca, ubicado al Noreste de volcán Tacora.

Específicamente en torno a la zona de estudio se ha identificado la presencia de tres principales zonas de alteración. Éstas se ubican al Oeste y Suroeste de volcán Tacora, así como también en el edificio volcánico mismo. En el caso de volcán Tacora, la alteración hidrotermal se desarrollaría sobre los depósitos glaciales y coluviales presentes en los flancos Noroeste, Noreste, Oeste y en el cráter. La alteración estaría caracterizada principalmente por la presencia de alunita y menores

cantidades de caolinita, lo cual indicaría la presencia de alteraciones de tipo argílica y argílica avanzada.

En el caso de la zona de alteración ubicada al Oeste de la zona de estudio, ésta se desarrollaría sobre las lavas de la Formación Oxaya (Huaylillas). Dicha zona estaría caracterizada por la presencia de pirofilita, alunita, y bajas cantidades de caolinita y clorita. Esto indicaría la ocurrencia de alteraciones de tipo argílica avanzada, argílica y propilítica, respectivamente. Estos mismos tipos de alteraciones se presentarían en el sector Suroeste dada la presencia de clorita, pirofilita, alunita, caolinita y menores cantidades de jarosita en lo que correspondería a las mismas lavas de Formación Oxaya. Esta zona de alteración se extiende hacia el Sur por aproximadamente 8 kilómetros.

De esta manera se ha realizado una identificación preliminar de las zonas de alteración presentes en la zona de estudio. Así se establece que en los depósitos glaciales y coluviales de volcán Tacora existiría presencia de alteraciones de tipo argílica y argílica avanzada. Por otro lado, en las lavas de Formación Oxaya (Huaylillas) se presentarían alteraciones de tipo propilítica, argílica y argílica avanzada. Estos resultados serán posteriormente comparados con los resultados de la caracterización de la mineralogía de alteración para así poder evaluar los resultados del análisis mediante sensores remotos.

Mapa de minerales de alteración

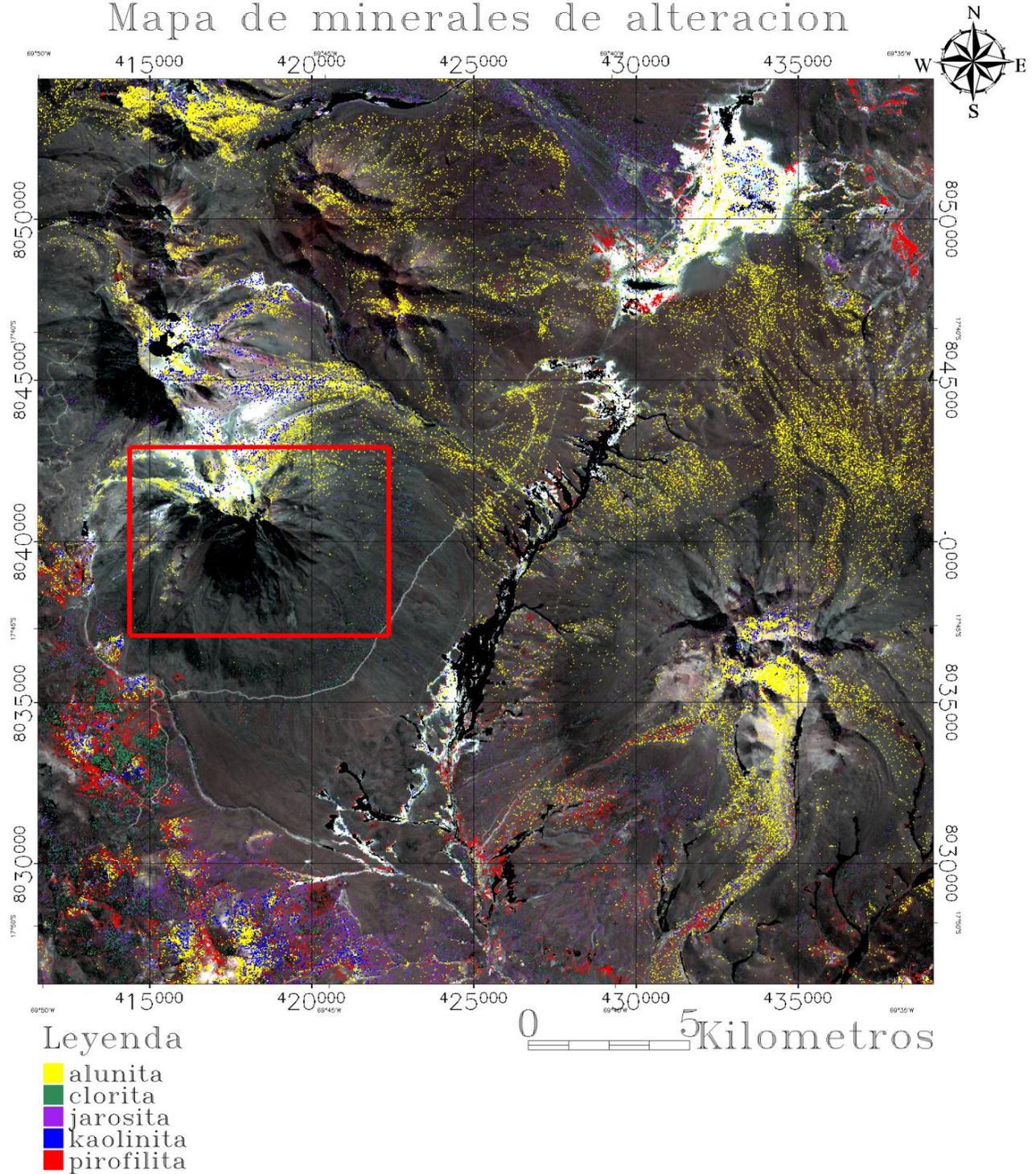


Figura 4-1. Mapa de minerales de alteración presentes en la superficie del área de volcán Tacora. Se destaca en un cuadro rojo los límites de la concesión geotérmica Volcán Tacora.

5. Resultados de la caracterización de la mineralogía de alteración hidrotermal

A continuación se presentan los resultados de la mineralogía de alteración hidrotermal presente en la zona de estudio describiéndose, en primer lugar, la ocurrencia y distribución de cada uno de los grupos de minerales identificados: azufre, fases silíceas, filosilicatos, sorosilicatos, sulfatos, sulfuros y óxidos. Posteriormente se resume la alteración por tipos de alteración identificando su patrón e intensidad de ocurrencia de dicha alteración. La información de la ocurrencia de los minerales de alteración está documentada en Anexos B y C.

5.1. Descripción y distribución de minerales de alteración

5.1.1. Azufre

Se ha identificado la importante presencia de depósitos de azufre en los campos de fumarolas. Este mineral se presenta con hábito masivo o agregados cristalinos de color amarillo intenso tanto al interior como en los bordes de las chimeneas por donde los gases son descargados a la superficie. Así también se ha encontrado estructuras tipo casquetes o bolsones rellenos en su interior con masas cristalinas de azufre (Figura 5-1). A menudo se presenta azufre junto con fases silíceas en las rocas piroclásticas ubicadas en el cráter de explosión.



Figura 5-1. Foto correspondiente al campo de fumarolas del NO. En ésta se identifica la presencia de un casquete relleno en su interior de azufre cristalino.

5.1.2. Fases silíceas

5.1.2.1. Ópalo-A

Los resultados de difracción de rayos X (Anexo C) indican la presencia de una fase mineral caracterizada por un pico ancho el cual se ha atribuido a la presencia de ópalo-A (Figura 5-2). Esta fase silíceá ha sido identificada en bloques de rocas correspondientes a depósitos coluviales ubicados sobre el campo de fumarolas Noroeste (Anexo A). Dada la presencia de plagioclasas en las lavas de Tacora, se establece que estos minerales son reemplazados por ópalo-A. Dicha fase posee un hábito cristalino de grano muy fino, color blanco a incoloro y brillo vítreo (Figura 5-2).

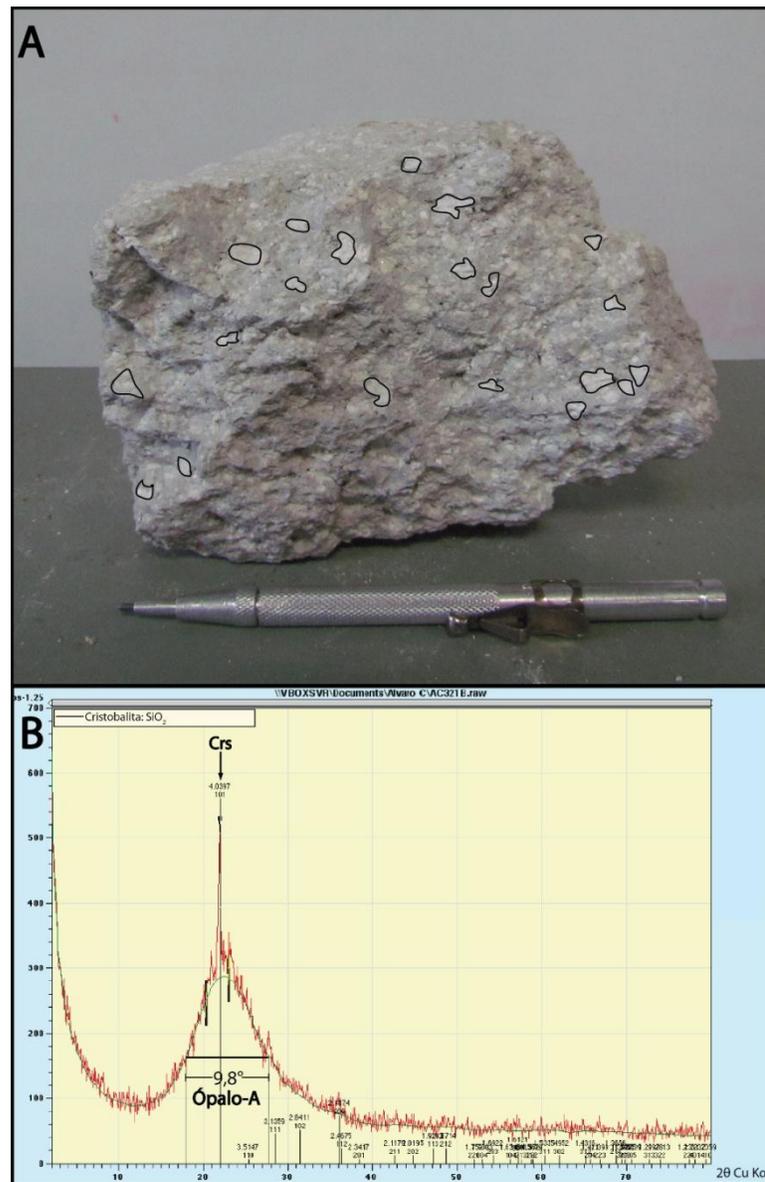


Figura 5-2. A. Muestra del campo de fumarolas Noroeste (código: 3.2.1.B) en la cual se destaca con círculos negros el dominio sometido a análisis de DRX. B. Difractograma de intensidad correspondiente a muestra indicada en A. Se indica la presencia de un pico con un ancho ($\Delta(2\theta)$) igual a 10° que indicaría la presencia de ópalo-A, y un pico de mayor intensidad el cual correspondería a cristobalita (ver Anexo C).

5.1.2.2. Cristobalita

De manera similar al caso del ópalo-A, se ha identificado la ocurrencia de esta fase silíceá a través de los resultados de DRX. En base a éstos se puede establecer que dicha fase se presentaría en agregados microcristalinos como reemplazo de fenocristales de feldespatos, rellenando vetillas y como agregados cristalinos en rocas piroclásticas con azufre, en bloques de roca pertenecientes a los depósitos glaciales y coluviales ubicados en los campos de fumarolas. Frecuentemente se presenta junto a otras fases silíceas tales como ópalo-A, tridimita y cuarzo (Figura 5-3).

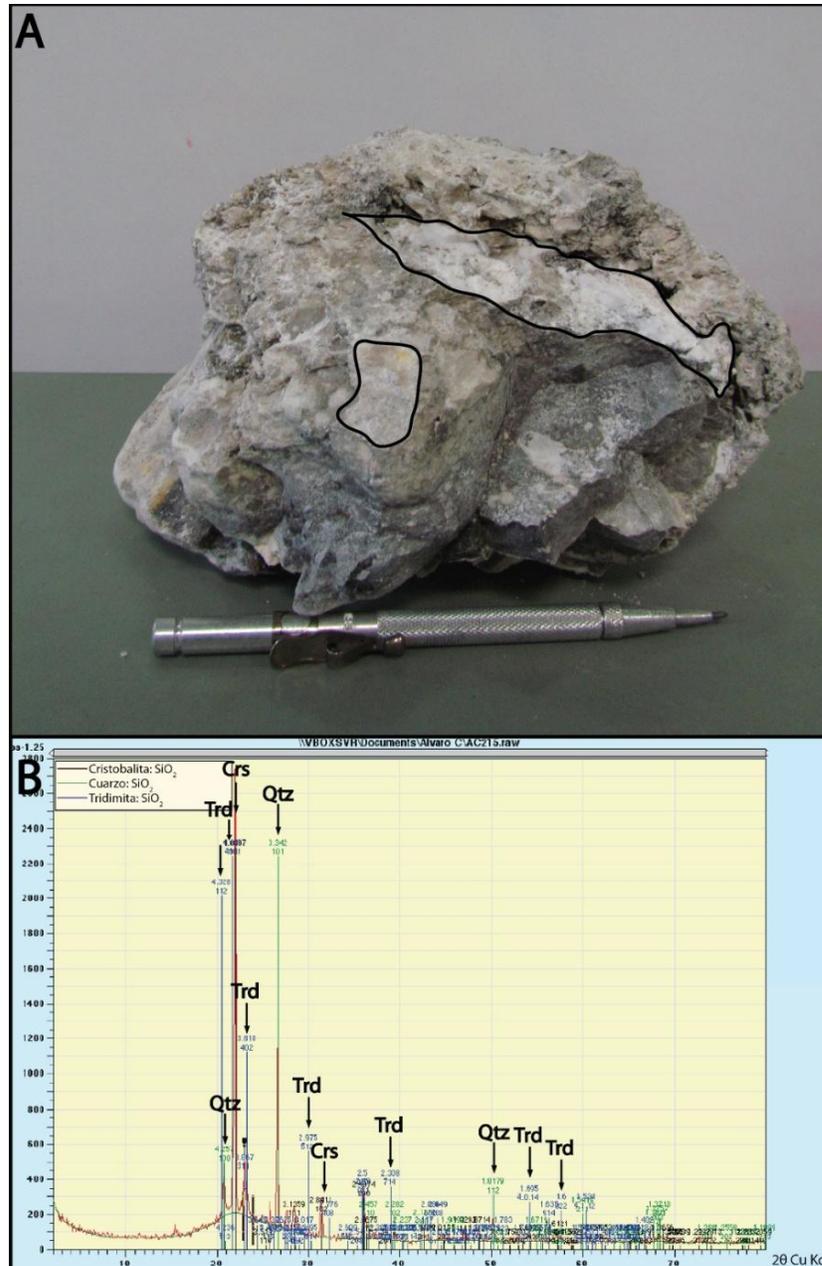


Figura 5-3. A. Bloque correspondiente al campo de fumarolas Oeste de volcán Tacora (código: 2.1.5). En líneas negras se destacan los dominios de la roca analizados mediante DRX. B. Difractograma de intensidad de A el que indicaría la presencia de cristobalita junto con fases silíceas tales como cuarzo (Qtz) y tridimita (Trd) (ver Anexo C).

5.1.2.3. Tridimita

Los resultados de XRD indican la ocurrencia de esta fase silíceas en agregados criptocristalinos como relleno de veta y vetillas. Esta se presentaría junto con cristobalita y cuarzo exclusivamente en el campo de fumarolas del Oeste (Figura 5-3).

5.1.2.4. Cuarzo

La información de los cortes transparentes y los resultados de DRX permiten identificar su ocurrencia en las zonas de alteración presentes tanto en volcán Tacora como en Formación Oxaya. Este mineral tiene distintas ocurrencias:

- Como producto de alteración de la masa fundamental de tobas y lavas de Formación Oxaya y de Volcán Tacora, en agregados cristalinos subhedrales de grano fino con textura “*jigsaw puzzle*”, y en agregados esferulíticos cripto-cristalinos en el caso de las tobas (Figura 5-4 A, B, E y F).
- Como reemplazo de fenocristales de feldespatos y plagioclasas en lavas de volcán Tacora y Formación Oxaya, como agregados cristalinos subhedrales de grano fino a medio con bordes irregulares (Figura 5-4 C y D).
- Como agregados cristalinos de grano fino en bloques de roca de naturaleza piroclástica, pertenecientes a depósitos coluviales glaciales de volcán Tacora.
- y rellenando vetillas como agregados cristalinos de grano fino subhedrales.

De esta manera, en la mayoría de las formas anteriormente mencionadas, la ocurrencia de las fases silíceas está asociada a un proceso de silicificación moderada a intensa. En particular el cuarzo se presenta frecuentemente junto a otras fases silíceas, así también junto a filosilicatos tales como illita, sericita, muscovita, esmectita y caolinita, y con sulfatos tales como alunita y jarosita.

5.1.3. Filosilicatos

5.1.3.1. Illita

En base a los resultados de DRX se ha identificado la ocurrencia de este mineral en las zonas de alteración correspondientes a las lavas de la Formación Oxaya. Aun cuando se ha identificado su presencia en rocas que presentan una textura obliterada, sin embargo considerando que las rocas afectadas corresponderían a lavas de naturaleza andesítica a dacítica, y sumado a esto el hecho que los resultados de DRX de la misma muestra indican la presencia de sanidina (asumiendo de origen ígneo), entonces se puede establecer que la ocurrencia de la illita sería como producto de

alteración de sanidina, presentándose junto con cuarzo (Muestra 1.1.5, Anexos B y C). Esto se correspondería con lo señalado por Thompson y Thompson (1996).

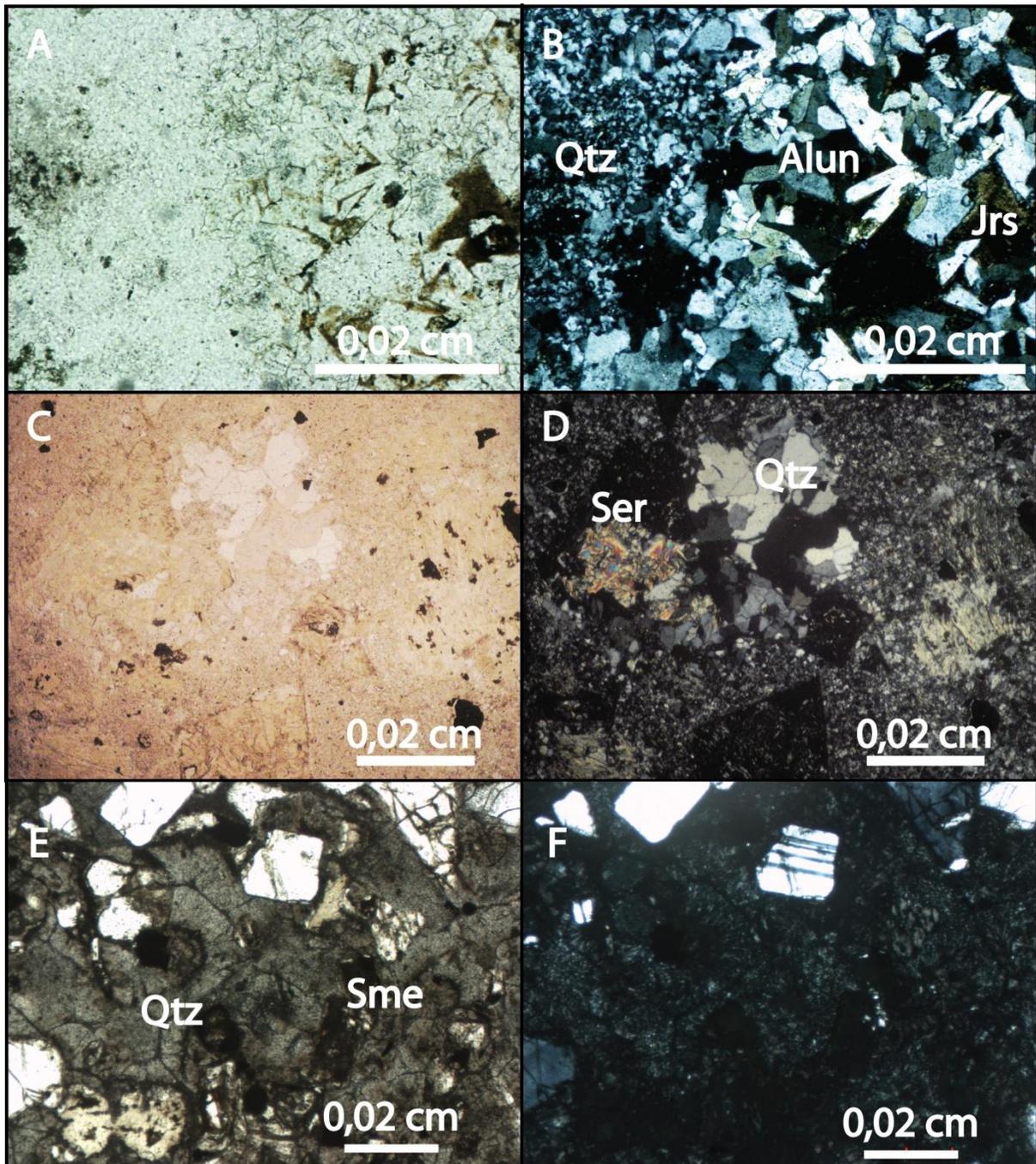


Figura 5-4. Fotomicrografías, a nicols paralelo (izquierda) y cruzado (derecha), de rocas con presencia de cuarzo como mineral de alteración. A y B. Lavas de Formación Oxaya con cuarzo en agregados micro-cristalinos con textura *jigsaw puzzle* como reemplazo de la masa fundamental. A la derecha se observa estructura *boxwork* con alunita (Alun) en su interior con textura-acicular, y jarosita (Jrs) en agregados criptocristalinos. C y D. Lavas de Formación Oxaya con cuarzo en agregados poli-cristalinos con bordes irregulares como reemplazo de fenocristales de feldspatos, junto con sericita (Ser). E y F. Tobas de Volcán Tacora con cuarzo en agregados criptocristalinos esferulíticos como alteración de la matriz vítrea, se presenta junto con agregados finos, con tono pardo oscuro, de esmectita (Sme).

5.1.3.2. Sericita

En base a observaciones macroscópicas y a la información de los cortes transparentes, se ha identificado la presencia de sericita en agregados cristalinos de grano fino como producto de alteración de feldspatos, frecuentemente junto con cuarzo, en lavas de Formación Oxaya (Figura 5-4.D).

5.1.3.3. Muscovita

De manera similar al caso de la illita, se ha identificado la ocurrencia de muscovita en base a los resultados de DRX. Éstos indican que este mineral se presentaría en agregados micro-cristalinos rellenando vetillas o como alteración de feldspatos en lavas de Formación Oxaya, en donde se presentaría frecuentemente junto a cuarzo (Figura 5-5).

De esta manera se puede observar que la presencia de illita, sericita y muscovita está relacionada a la ocurrencia de cuarzo.

5.1.3.4. Caolinita

En base a observaciones macroscópicas, la información de los cortes transparentes y a los resultados de DRX se ha identificado la presencia de este mineral en las lavas de Formación Oxaya. Este mineral se presentaría como agregados cristalinos intercrecido con alunita en estructura *boxwork* y como alteración superficial de feldspatos en agregados terrosos. Se presenta frecuentemente junto con hematita, goethita, jarosita y alunita.

5.1.3.5. Esmectita

En base a información de las propiedades ópticas de este mineral, contenidas en la bibliografía se ha identificado su presencia como producto de alteración de la matriz de bloques de roca de naturaleza piroclástica. Este mineral se presentaría como agregados cripto-cristalinos diseminados en la matriz y su ocurrencia estaría asociada a la presencia de cuarzo con textura esferulítica (“calcedonia”) (Figura 5-4.E).

5.1.3.6. Clorita

En base a observaciones macroscópicas y a la información de los cortes transparentes, se ha identificado su presencia en lavas, de naturaleza andesítica y dacítica, pertenecientes a Formación Oxaya. Este mineral se presenta como producto de una alteración de plagioclasas y feldespatos en agregados micro-cristalinos, comúnmente asociados a la ocurrencia de minerales tales como epidota, calcita y óxidos (opacos) (Figura 5-6). Así también, en otros casos, se presenta como producto de alteración de la masa fundamental de las mismas lavas (Anexo B).

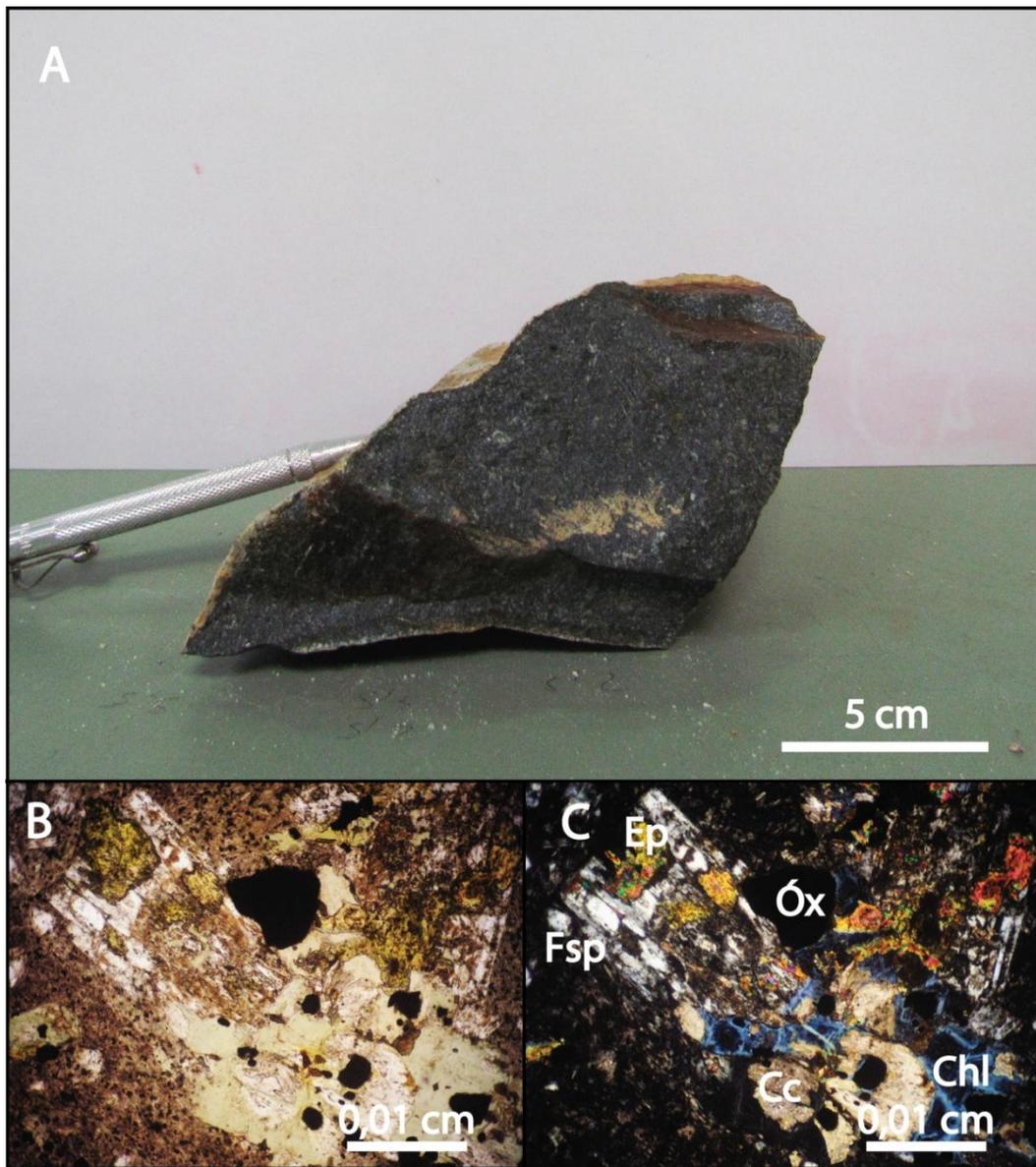


Figura 5-6. A. Muestra perteneciente a Formación Oxaya, (código: 1.2.5.A, Anexo B). B y C. Fotomicrografías a nicols paralelo (B) y cruzado (C) en donde se destaca la presencia de clorita (Chl), epidota (Ep), calcita (Cc) y óxidos (Óx) como producto de alteración de feldespatos y plagioclasas.

5.1.4. Sorosilicatos

5.1.4.1. Epidota

En base a información de los cortes transparentes se ha identificado la presencia de epidota, en agregados cristalinos subhedrales de grano fino a medio, como producto de alteración de plagioclasas y feldespatos contenidos en las lavas de Formación Oxaya (Figura 5-6 B y C).

5.1.4.2. Zunyita

En base a los resultados de DRX y a la presencia de picos en 8,07 Å (111), 4,21 Å (321), 4,02 Å (222), 2,84 Å (422) y 2,68 Å (511), se ha identificado la presencia de zunyita ($\text{Al}_{18}\text{Si}_5\text{O}_{20}(\text{OH},\text{F})_{18}\text{Cl}$) como relleno de vetillas que afectan a las lavas de la Formación Oxaya. Este mineral se presentaría junto con cuarzo, muscovita, caolinita y jarosita (ver Anexo B, código 1.2.3.A).

5.1.5. Sulfatos

5.1.5.1. Alunita

La información de los cortes transparentes indica la presencia de alunita en lavas correspondientes a Formación Oxaya. Este mineral se presenta como agregados cristalinos tabulares pseudo-aciculares al interior de estructura tipo *boxwork* (Figura 5-4 B). Dentro de este mismo dominio de la roca, y considerando que Thompson y Thompson (1996) describen que la ocurrencia de caolinita intercrecida con alunita le concede a este último un aspecto moteado, se ha identificado la ocurrencia de alunita junto con caolinita. También se presentan junto con jarosita y cuarzo.

5.1.5.2. Jarosita

La información obtenida de los cortes transparentes y los resultados de DRX permiten identificar la presencia de jarosita, como agregados cripto- a micro-cristalinos al interior de vetillas (Anexo B y C, código: 1.2.3.A) y estructura tipo *boxwork*, en lavas correspondientes a Formación Oxaya (Figura 5-4 B). Adicionalmente se ha identificado su presencia en los campos de fumarolas de volcán Tacora, pero en cantidades menores y como agregados cripto-cristalinos.

5.1.5.3. Anhidrita/Yeso

Se ha identificado la presencia de anhidrita en los campos de fumarolas del volcán Tacora, específicamente en el campo ubicado en el Noroeste. En esta zona se presenta anhidrita como cristales tabulares en agregados aciculares relleno de vetillas, junto con la presencia de yeso. Este último tiene ocurrencia en agregados cristalinos anhedral que cuya presencia se debería a una alteración de la anhidrita producto de un proceso de alteración superficial (hidratación) (Figura 5-7).

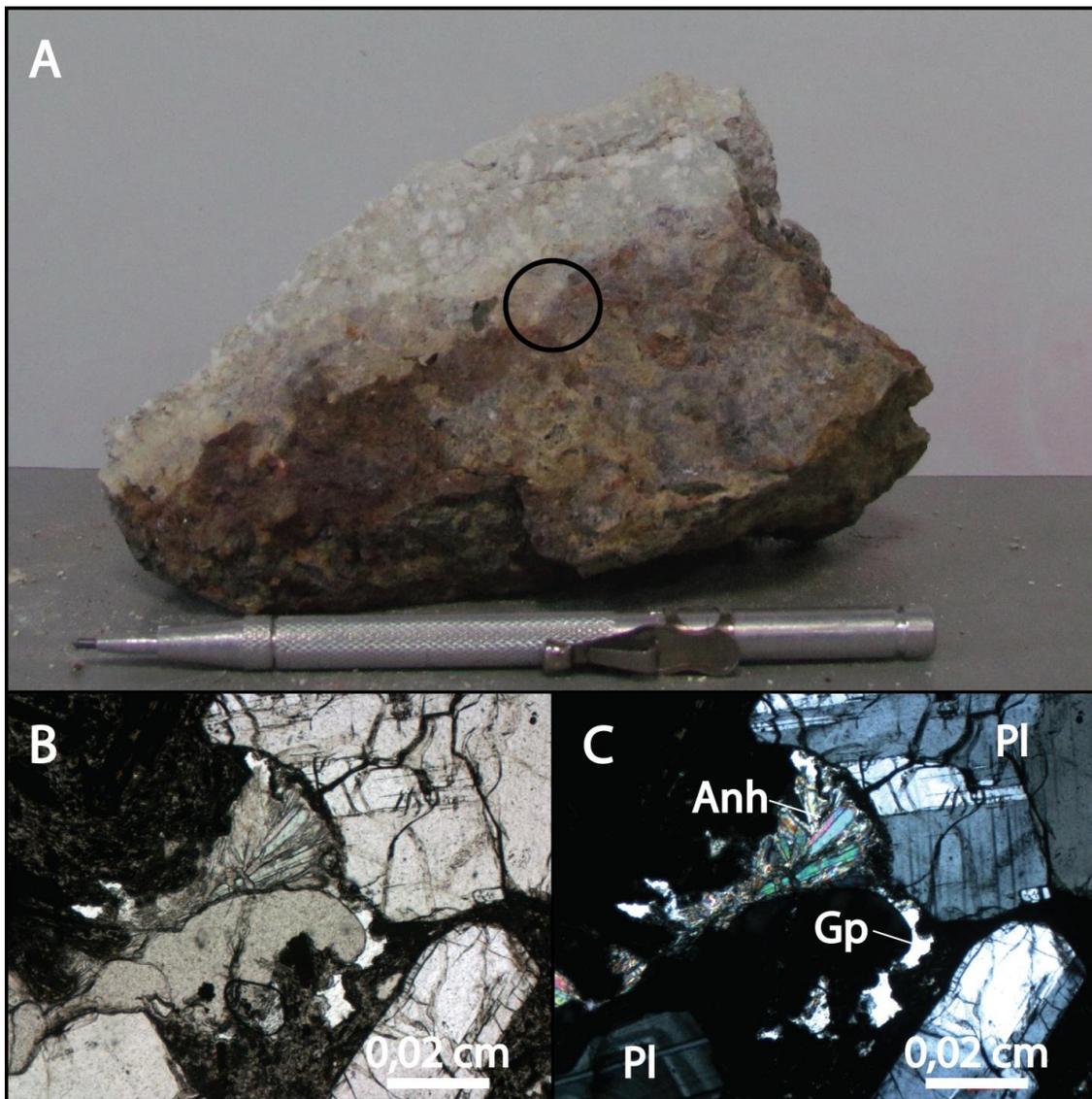


Figura 5-7. A. Muestra perteneciente al campo de fumarolas Noroeste. Se destaca en círculo negro el dominio en el cual se identifica la presencia de anhidrita y yeso. B y C. Fotomicrografías de la muestra en A. Se identifica una vetilla irregular en cuyo interior la anhidrita (Anh) presenta un hábito acicular. Continuando por la vetilla hacia abajo se observa el paso de anhidrita a yeso (Gp).

5.1.6. Sulfuros

5.1.6.1. Pirita

Se ha identificado la presencia de pirita como relleno de vetillas y como masas granulares diseminadas, de grano muy fino, en lavas correspondientes a Formación Oxaya. Así también se presenta en la zona de alteración del sector Noreste. En todos los casos, su presencia no alcanza el 1% de la muestra.

5.1.7. Carbonatos

5.1.7.1. Calcita

Se ha identificado la ocurrencia de calcita como cristales aislados subhedrales, de grano fino, en las lavas de Formación Oxaya. En éstas se presenta como producto de alteración de cristales de plagioclasas y feldespatos. La ocurrencia de este mineral esta siempre asociada a la presencia de clorita, epidota y óxidos (opacos) (Figura 5-6).

5.1.8. Óxidos e hidróxidos

5.1.8.1. Hematita

En base a observaciones de terreno y a la información de cortes transparentes se ha identificado la presencia de hematita en lavas de Formación Oxaya, y en los depósitos glaciales de volcán Tacora. En el caso de Formación Oxaya, este mineral se presenta como agregados cristalinos, de grano muy fino, rellenando vetillas y estructuras tipo *boxwork*, así también como pátinas de oxidación en la superficie de las lavas (Figura 5-8). Así también este mineral se presenta, en los campos de fumarolas de volcán Tacora, como relleno de vetillas y patinas de oxidación.

5.1.8.2. Goethita

De manera similar al caso de hematita, se ha identificado la escasa presencia de goethita tanto en las lavas de Formación Oxaya como en los campos de fumarolas de Volcán Tacora. Este mineral se presenta, en el caso de Formación Oxaya, como agregados cristalinos, de grano muy fino, como relleno de estructuras tipo *boxwork* y como pátinas de oxidación (Figura 5-8). En el caso de volcán Tacora, este mineral se presenta exclusivamente como pátinas de alteración superficial.

5.1.8.3. Óxidos (opacos)

En base a la información de los cortes transparentes se ha identificado la presencia de minerales opacos, los cuales han sido identificados como óxidos. Éstos se presentan en agregados cristalinos, de grano muy fino a fino, como alteración de la masa fundamental y como bordes de alteración de fenocristales de clinopiroxeno y biotita contenidos en lavas pertenecientes a Volcán Tacora y Formación Oxaya. En esta última también se ha identificado la ocurrencia de estos minerales, comúnmente junto con clorita y epidota, como producto de alteración de feldespatos y plagioclasas en lavas de dicha unidad, presentándose como cristales subhedrales pseudo-cúbicos de grano fino a medio (Figura 5-6).

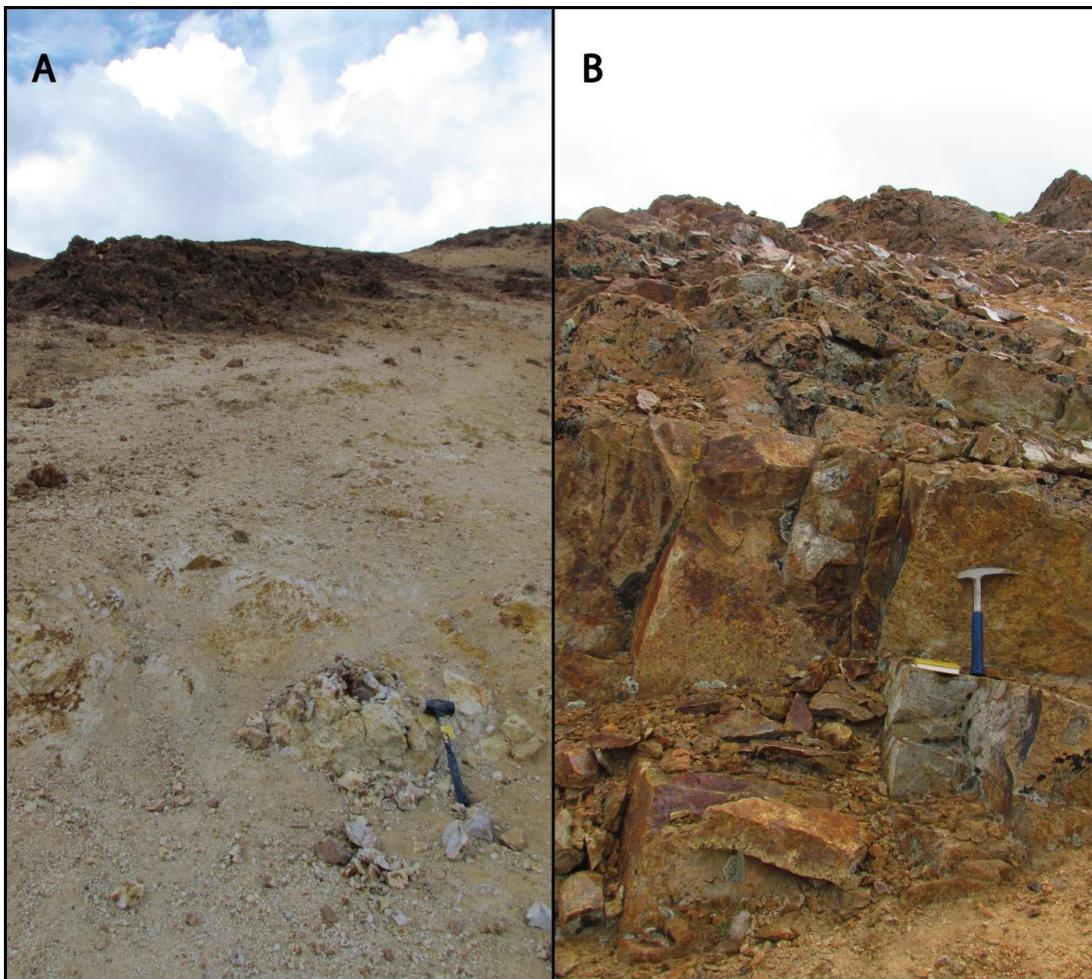


Figura 5-8. A y B. Afloramientos de lavas pertenecientes a Formación Oxaya. Se destaca la presencia de hematita y goethita como pátinas de oxidación que le dan un tono pardo rojizo a los afloramientos.

De esta forma, en base a observaciones macroscópicas, información de cortes transparentes y los resultados de DRX se ha descrito la alteración hidrotermal presente en la zona de estudio en

términos de la ocurrencia y distribución de cada uno de los grupos minerales identificados. A continuación se presenta una síntesis con la distribución y ocurrencia de los minerales de alteración identificados en la zona de estudio. En ésta se presenta la ocurrencia de los minerales, distinguiendo las categorías de: producto de alteración de minerales, masa fundamental o matriz (a), relleno de *boxwork* (b), depositación (d) o como pátinas superficiales (p). Así también se indica el grado de presencia del mineral, distinguiendo las categorías de: ausente (-), escasa presencia (x) y considerable presencia (X). En el caso de estas dos últimas categorías, un contenido inferior al 10% se define como presencia escasa, y como presencia considerable a contenidos superior al 10% (Tabla 2).

Tabla 2. Síntesis de la mineralogía de alteración identificada en la zona de estudio. En esta se distingue una distribución en la ocurrencia de los minerales de alteración.

Minerales de alteración	Volcán Tacora		Fm. Oxaya
	Campos de fumarolas	Sector Noreste	
azufre	X/d	-	-
ópalo-A	x/a	-	-
crystalita	X/a, d	-	-
tridimita	x/d	-	-
cuarzo	X/a, d	X/a	X/a, d
illita	-	-	X/a, d
sericita	-	-	X/a
muscovita	-	-	X/a, d
caolinita	-	-	X/a, d
esmectita	-	X/a	-
clorita	-	-	X/a
epidota	-	-	X/a
zunyita	-	-	x/d
alunita	-	-	X/b, d
jarosita	x/d	x/d	x/d
anhidrita	x/d	-	-
pirita	-	x/d	x/d
calcita	-	-	x/a
yeso	x/a	-	-
hematita	x/p	-	x/b, d, p
goethita	x/p	-	x, b, p
óxidos (opacos)	x/a	-	x/a

grado de presencia	simbología	Ocurrencia	simbología
ausente	-	alteración	a
escasa presencia	x	boxwork	b
considerable presencia	X	depositación	d
		pátinas	p

5.2. Tipos de alteración y asociaciones minerales

En base a la distribución y ocurrencia de los minerales se ha identificado que la zona de estudio ha sido afectada por distintos tipos de alteración. A continuación se establecen los distintos tipos de alteración identificados, describiendo su distribución, asociaciones minerales (o “*mineral assemblages*”) patrones e intensidad de ocurrencia que las caracterizan.

5.2.1. Alteración propilítica

Esta alteración, que afecta a las lavas de la Formación Oxaya ubicadas al Oeste y Suroeste de la zona de estudio, está caracterizada por la asociación clorita-epidota±calcita±óxidos±pirita y con escasa presencia de cuarzo en vetillas. Debido a que, en algunos casos, la alteración se encuentra restringida a los fenocristales de plagioclasas y, en otros, afecta tanto a los fenocristales como a la masa fundamental de las rocas, entonces es posible decir que la alteración se presenta de manera selectiva a penetrativa, pero sin alterar la textura original de las lavas.

5.2.2. Alteración argílica

Esta alteración se presenta con distintas asociaciones minerales en lavas de Formación Oxaya y en los depósitos glaciales ubicados en el sector Noreste de volcán Tacora. En el caso de Formación Oxaya esta alteración se presenta en una zona de transición ubicada entre las lavas afectadas por alteración propilítica, al Oeste de volcán Tacora, y las lavas afectadas por alteración argílica avanzada en el sector Suroeste de la zona de estudio. La asociación mineral características de esta alteración corresponde a cuarzo-illita±sericita±muscovita la cual, en ocasiones, se presenta controlada por estructuras, con cuarzo-illita o cuarzo-muscovita como relleno de vetillas, y en otros casos de manera pervasiva, con la ocurrencia de cuarzo-sericita como alteración de fenocristales de plagioclasas o de la masa fundamental de las lavas de Formación Oxaya. En este último caso la alteración presenta variaciones en la intensidad debido a que en algunas ocasiones existe una preservación de la textura original de las lavas, mientras que en otras ocasiones existe una destrucción de dicha textura.

Por otro lado en el caso de volcán Tacora, esta alteración afecta a toda la roca de manera moderada y se caracteriza por la presencia de esmectita-pirita-jarosita como productos de alteración de la matriz vítrea y, posiblemente, de magnetita primaria.

5.2.3. Alteración argílica avanzada

Al igual que la alteración argílica, la alteración argílica avanzada se presenta con distintas asociaciones minerales en Formación Oxaya y en volcán Tacora. En las lavas de Formación Oxaya, la asociación mineral correspondería a cuarzo-alunita±caolinita-jarosita y con zunyita como mineral accesorio. Esta alteración se presenta controlada por estructuras tales como vetillas rellenas con jarosita-caolinita-zunyita, en estructura tipo *boxwork* con alunita-caolinita-jarosita, y de manera pervasiva con la presencia de cuarzo oqueroso afectando toda la roca de modo tal que oblitera la textura inicial de las lavas.

En el caso de volcán Tacora, esta alteración se caracteriza por la asociación azufre, cristobalita-jarosita±anhidrita/yeso la cual se presenta en los campos de fumarolas. Esta alteración se presenta de manera pervasiva, con la ocurrencia de azufre, cristobalita±jarosita, y en algunos casos controlada por estructuras, dada la ocurrencia de anhidrita/yeso como relleno de vetillas.

5.2.4. Silicificación

La importante presencia de fases silíceas en las zonas de alteración ubicadas en volcán Tacora, permiten establecer la ocurrencia de una alteración de tipo silicificación. Esta alteración se presenta de manera moderada y caracterizada por la presencia de cuarzo como alteración de fenocristales y como desvitrificación de matriz, con textura esferulítica, de rocas piroclásticas del sector Noreste. Así también se presenta, con la asociación cuarzo-cristobalita±tridimita±ópalo-A, como relleno de vetillas y de manera pervasiva como reemplazo de fenocristales y masa fundamental en los campos de fumarolas desarrollados sobre depósitos glaciales y coluviales.

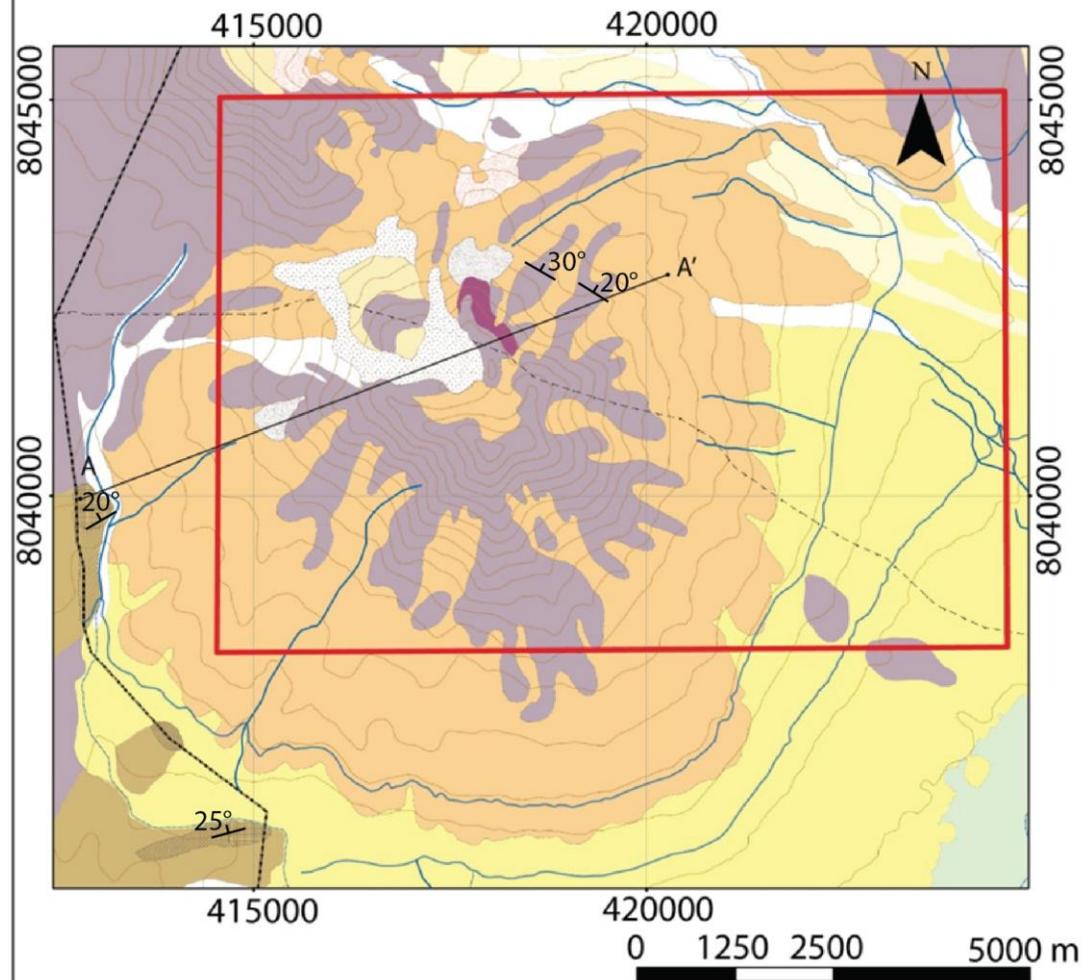
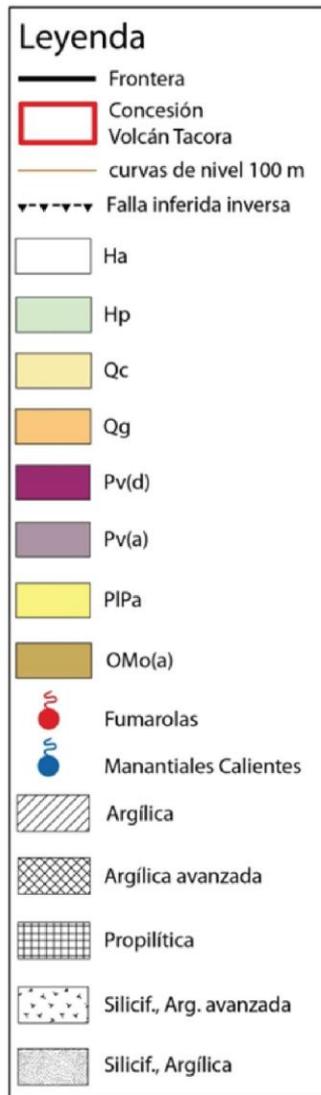
5.2.5. Alteración superficial

Si bien no se considera una alteración hidrotermal como tal, se ha definido la ocurrencia de una alteración superficial la cual se presenta en toda la zona de estudio. Esta alteración está caracterizada por la presencia óxidos e hidróxidos tales como hematita y goethita. Esta alteración se presenta débil, caracterizada por la presencia óxidos que ocurren como bordes de alteración de fenocristales de clinopiroxeno y biotita contenidos en rocas que muestran un grado de alteración incipiente. También se observa la presencia de hematita y goethita como pátinas superficiales o relleno de vetillas. Se ha identificado la presencia de hematita y goethita como relleno de estructura tipo *boxwork*. Esto podría llevar a concluir que la presencia de estos minerales estaría asociada a una alteración de tipo argílica avanzada. Sin embargo se ha identificado la presencia

de estos mismos minerales como pátinas y relleno de vetillas, hecho que permite inferir que su presencia al interior de dichas estructuras correspondería a una alteración superficial posterior a la alteración de tipo argílica avanzada.

De esta manera, se ha caracterizado de la ocurrencia y distribución de los distintos tipos de alteración presentes en la zona de estudio. Esto puede verse reflejado en un mapa que sintetiza los tipos de alteración presentes en la zona de estudio (Figura 5-9).

Figura 5-9. (Página siguiente). Mapa de alteración correspondiente al área de volcán Tacora. En esta se presentan las distintas unidades geológicas, manifestaciones termales en superficie y tipos de alteración identificados.



6. Discusiones

6.1. Resultados de la caracterización de la mineralogía de alteración

El estudio de la ocurrencia y distribución de los minerales de alteración tiene gran importancia en el desarrollo de modelos conceptuales de campos geotermales y depósitos hidrotermales. De esta manera, la ocurrencia de algunos minerales puede ser un indicador de condiciones de temperaturas y composición de los fluidos hidrotermales que generan dicha mineralogía (Reyes, 1990). A continuación se discute los resultados de la mineralogía de alteración presente en la zona de estudio, para sí intentar establecer un modelo conceptual de las condiciones de temperaturas y composición de los fluidos hidrotermales que generan las zonas de alteración presentes en volcán Tacora y Formación Oxaya.

6.1.1. Volcán Tacora

6.1.1.1. Presencia simultánea de fases silíceas.

En los campos de fumarolas se ha identificado la presencia simultánea de fases silíceas tales como cristobalita, tridimita y cuarzo los cuales definen la alteración de tipo silicificación. Swamy et al. (1994) establece las condiciones termodinámicas que definen los campos de estabilidad de una serie de fases silíceas entre las cuales se encuentra cuarzo, cristobalita y tridimita (Figura 6-1).

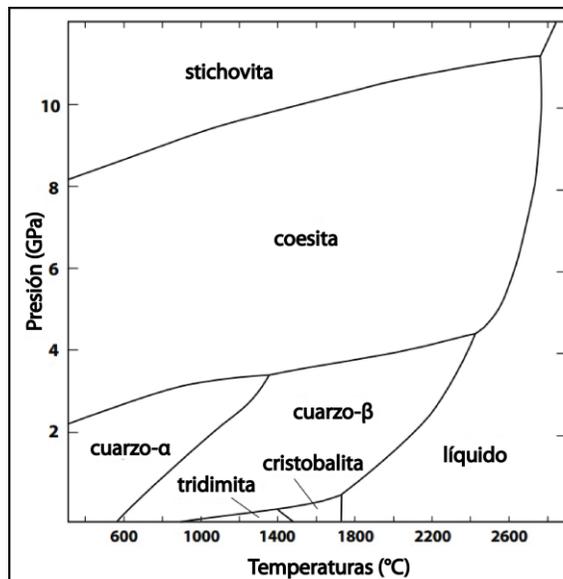


Figura 6-1. Diagrama de estabilidad de las distintas fases silíceas. Se observa que la cristobalita y la tridimita son estables bajo condiciones de baja presión y alta temperatura. Modificado de Swamy et al. (1994).

Los resultados del trabajo de Swamy et al. (1994) establecen que la ocurrencia de cuarzo (cuarzo- α) es estable a presiones menores a 3 GPa y a temperaturas menores 600°C. En el caso de cristobalita y tridimita, se establece que éstas fases silíceas son estables a presiones menores a 1 GPa, y a temperaturas de 1000-1400°C en el caso de tridimita y a 1400-1800°C para la cristobalita. Dada la ocurrencia simultánea de cuarzo, tridimita y cristobalita, y considerando lo establecido por Swamy et al. (1994), se presenta una problemática desde el punto de vista de las condiciones termodinámicas de formación de la silicificación.

Esta condición podría sugerir una variación en las condiciones de temperatura que generaron el proceso de silicificación. De esta manera, a baja presión se habrían alcanzado temperaturas en torno a los 1000-1800°C, condiciones necesarias para la ocurrencia de cristobalita y tridimita. Sin embargo, si hubiese ocurrido un proceso con dichas características, se esperaría una mayor presencia de cristobalita y tridimita como minerales de alteración, hecho que no se corresponde con los resultados obtenidos en el presente trabajo. Por lo tanto se tendría que la tridimita y cristobalita constituyen fases meta-estables dentro de la alteración presente en los campos de fumarolas. Sin embargo, Corbett y Leach (1998) señalan que la presencia de fases silíceas tales como sílice amorfa (e.g. ópalo-A), cuarzo, tridimita y cristobalita, estaría controlada por un rápido descenso de la temperatura de los fluidos hidrotermales saturados en sílice, a partir de los cuales precipitan dichas fases minerales.

Así finalmente se tendrá que desde el punto de vista de la termodinámica, cristobalita y tridimita son consideradas fases meta-estables. Y su presencia en superficie junto a fases silíceas tales como ópalo-A y cuarzo estaría controlada por un rápido descenso de la temperatura de fluidos hidrotermales saturados en sílice.

6.1.1.2. Condiciones de ocurrencia de los eventos de alteración hidrotermal.

La alteración identificada en volcán Tacora se caracteriza por la ocurrencia de alteraciones de tipo argílica, argílica avanzada y silicificación. En base a la mineralogía y textura de las zonas de alteración presentes, se podría identificar las características químicas, físicas de los fluidos hidrotermales y los procesos que generarían dicha alteración.

Silicificación

Los campos de fumarolas ubicados en volcán Tacora presentan una alteración de tipo silicificación caracterizada por la presencia de cuarzo-cristobalita±tridimita±ópalo-A. Corbett y

Leach (1998) señalan que la ocurrencia de dichas fases silíceas se presenta principalmente bajo condiciones de $\text{pH} < 2$ y con un rápido descenso de la temperatura de los fluidos hidrotermales hasta alcanzar temperaturas inferiores a 100°C . Esto sugeriría que el proceso de silicificación presente en los campos de fumarolas del volcán Tacora se generaría producto de un rápido descenso en la temperaturas de los fluidos hidrotermales, alcanzando valores inferiores a 100°C .

Alteraciones argílica y argílica avanzada

Las alteraciones de tipo argílica y argílica avanzada identificadas en volcán Tacora están caracterizadas por las asociaciones minerales esmectita-pirita-jarosita y azufre, cristobalita±jarosita y anhidrita, respectivamente. De esta manera, en ambos tipos de alteración se tiene presencia de sulfatos secundarios como parte de su asociación mineral característica.

Zimbelman et al, (2005) establece que la mayoría de los sulfatos provienen de una mezcla de fluidos de origen magmático con aguas meteóricas superficiales. En particular el autor postula que la pirita hidrotermal proviene, a grandes rasgos, de una interacción de gases magmáticos (e.g H_2S) con el Fe contenido en lavas en el stratovolcán, lo que correspondería a un ambiente de tipo magmático-hidrotermal somero (Rye et al, 1992). Esto se corresponde con Capaccioni et al. (2012) que establece que los gases emitidos desde las fumarolas de volcán Tacora evidenciarían una significativa componente de desgasificación magmática.

Así mismo, Zimbelman et al. (2005) establece que la asociación esmectita-jarosita, presente en rocas volcánicas que evidencian una alteración débil, provienen de fluidos sulfatados cuyo origen está asociado a la oxidación supérgena ocurrida sobre el nivel de aguas subterráneas. Esta alteración ocurriría bajo restringidas condiciones de pH, actividad de sulfato, potasión, aluminio, y temperatura (Figura 6-2).

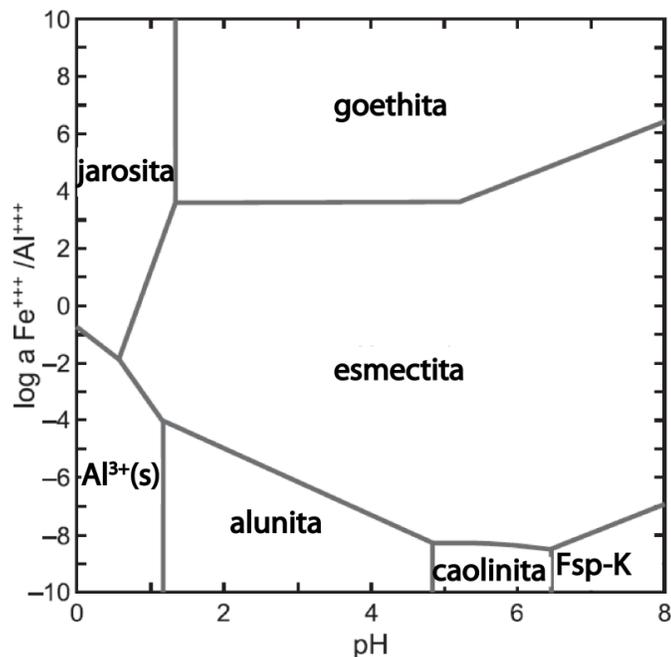


Figura 6-2. Diagrama de estabilidad del sistema Al-Fe-Si-S-K-O como pH v/s $\log a(\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+})$ en condiciones de $T=15^\circ\text{C}$, $\log a(\text{SO}_4)=-1,87$, $\log a(\text{K})=-3,2$ y con presencia de cristobalita como fase silícea. Modificado de Zimbelman et al. (2005).

De la figura se desprende que la asociación jarosita-esmectita se presentaría en condiciones de pH entorno a 1, baja actividad de aluminio y bajas temperaturas ($\sim 15^\circ\text{C}$). Luego, dado que lo establecido por Zimbelman et al. (2005) se corresponde con la asociación mineral característica de la alteración argílica definida para el sector Noreste de volcán Tacora. Entonces se puede sugerir esta alteración se generaría sobre el nivel de aguas subterráneas y cuyo origen tendría una componente de origen profundo, correspondiente a la interacción de gases magmáticos (H_2S) con las rocas volcánicas, y una componente de origen supérgena como sería a la oxidación de la pirita. Esta idea debería ser corroborada, posteriormente, con un estudio de isotopía estable de $\delta^{34}\text{S}$, δD y en $\delta^{18}\text{O}_{(\text{SO}_4)}$ en sulfuros, sulfatos esperando que haya una correspondencia entre los valores correspondientes a los sulfatos y los sulfuros como pirita.

En el caso de la alteración argílica avanzada, la presencia de azufre se generaría por depositación como producto de la oxidación de gases volcánicos como H_2S a través de la reacción: $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$. Por otro lado, Zimbelman et al. (2005) establece que la jarosita hidrotermal tiene dos posibles orígenes. Uno esta asociado fluidos sulfatados provenientes de la oxidación supérgena de la pirita, en donde se suele presentar junto con esmectita, y otro origen es asociado a los fluidos sulfatados provenientes de la oxidación de H_2S a través de la reacción: $\text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ la cual ocurriría en un ambiente sulfatado-ácido de tipo calentado por vapor, comúnmente presente en campos de fumarolas. En este último caso, la formación de jarosita

estaría dada bajo condiciones de pH con valores extremadamente bajos y un alto valor de la actividad de la razón $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$ (Figura 6-3).

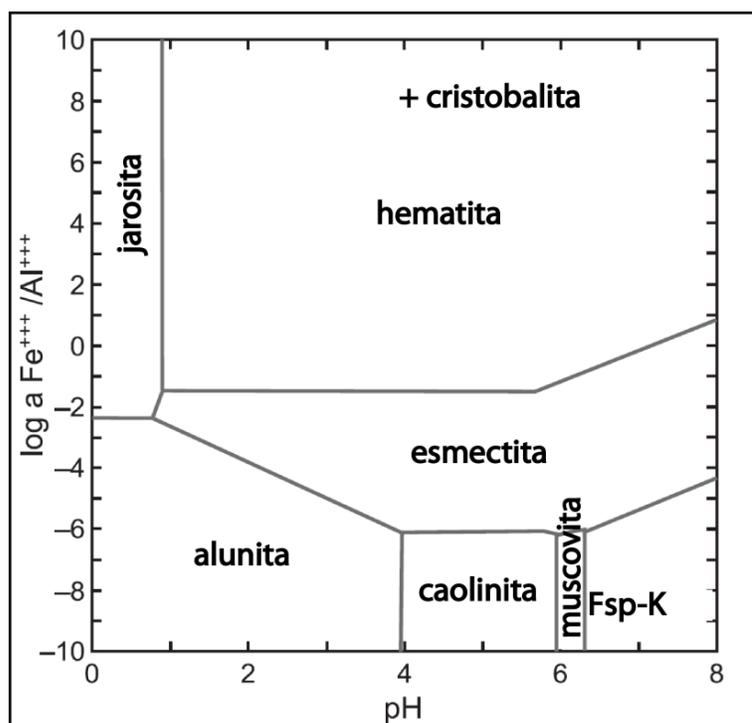


Figura 6-3. Diagrama de estabilidad del sistema Al-Fe-Si-S-K-O como pH v/s $\log a(\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+})$ en condiciones de $T=100^\circ\text{C}$, $\log a_{(\text{SO}_4)}=-1,87$, $\log a_{(\text{K})}=-3,2$ y cristobalita como fase silícea presente. Modificado de Zimbelman et al (2005).

Por otro lado la presencia de anhidrita/yeso como relleno de vetillas tendría dos posibles orígenes. Uno de ellos correspondería a la mezcla de fluidos sulfatados, de origen magmático, con aguas meteóricas diluidas, en un ambiente sulfatado-ácido de tipo calentado por vapor. Mientras que el otro posible origen consistiría en un ciclo de disolución/depositación de sulfatos solubles, como es el caso de anhidrita y yeso. Este ciclo estaría controlado por la ocurrencia de períodos de sequedad y humedad, así como también por la tasa de desgasificación magmática. Dado que a mayor tasa de desgasificación los gases salen rápidamente del sistema, no se favorece la interacción de gases magmáticos con aguas meteóricas y consecuentemente no se favorece la formación de sulfatos secundarios (Zimbelman et al., 2005).

El mismo autor establece que, en un ambiente sulfatado-ácido de tipo calentado por vapor ($T=100^\circ\text{C}$), las condiciones de estabilidad de anhidrita estarían controladas por la abundancia relativa de cationes y la baja solubilidad aluminio (Figura 6-4).

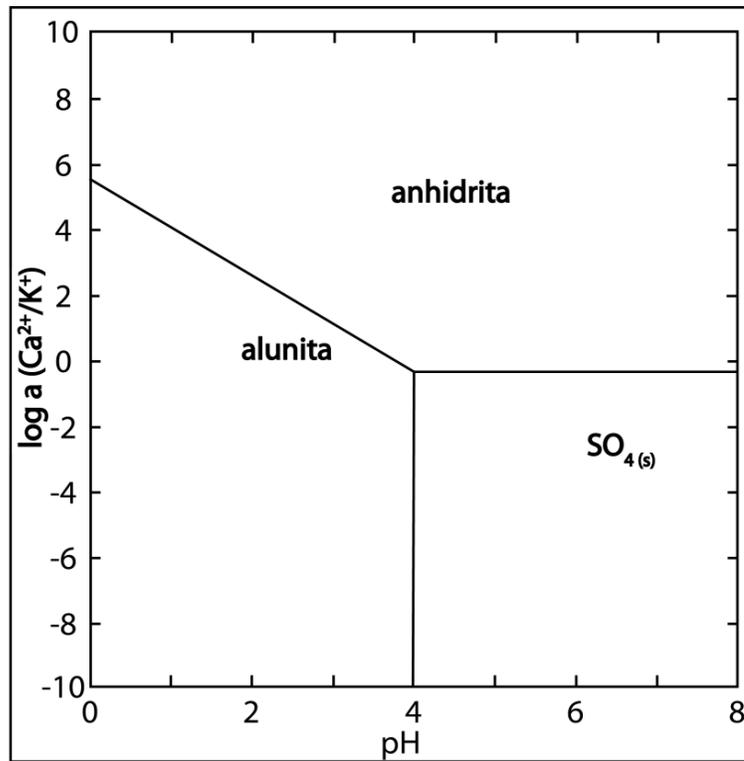


Figura 6-4. Diagrama de estabilidad de sulfatos en función de pH y la razón $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$. El diagrama fue calculado a $T=100^\circ\text{C}$, con $\log a(\text{SO}_4)=-1,87$ y $\log a(\text{K})=-3,2$ y con cristobalita como fase silícea presente.

Considerando lo anteriormente señalado y dado el hecho que la presencia de anhidrita/yeso en la zona de estudio es escasa. Entonces no es posible inferir un claro origen de los fluidos sulfatados que darían origen a anhidrita/yeso. Sin embargo, dado que se ha identificado su ocurrencia en uno de los campos de fumarolas, lo cual coincide con el origen magmático-hidrotermal de fluidos sulfatados. Entonces es posible sugerir que existiría, al menos, una componente de origen magmática-hidrotermal en los fluidos sulfatados a par depositaría anhidrita/yeso. Sin descartar una componente de sulfato reciclado.

Luego dado que la alteración argílica avanzada esta caracterizada por la presencia de azufre, jarosita-cristobalita y anhidrita/yeso en vetillas. Sumado a esto a que no se ha identificado la presencia de esmectita, y considerando lo señalado por Zimbelman et al. (2005) respecto a los posibles orígenes de los sulfatos tales como jarosita y anhidrita. Entonces es posible sugerir que la alteración argílica avanzada presente en los campos de fumarolas de volcán Tacora, se generaría en un ambiente sulfatado-ácido, de tipo calentado por vapor, por la mezcla de fluidos sulfatados de origen magmático con aguas meteóricas ubicadas en los niveles superiores del edificio volcánico, así como también por la oxidación de gases como H_2S . En este ambiente se presentarían valores de pH inferiores a 1 y temperaturas entorno a los 100°C . Además no se descartaría una componente de sulfato reciclado.

De esta manera se sugiere que la ocurrencia de alteración argílica, argílica avanzada y silicificación en volcán Tacora estaría dada por la presencia de fluidos hidrotermal de carácter ácido, con valores de $\text{pH} < 1-2$ que presentan una rápida tasa de descenso de la temperatura, inferiores a 100°C . Esto se correspondería con una posible presencia de aguas meteóricas en los niveles superiores que se mezclarían con fluidos provenientes de un proceso de desgasificación magmática, generando un ambiente sulfatado-ácido de tipo calentado por vapor.

Así también existiría una componente de origen supérgena, en la alteración identificada en volcán Tacora. Ésta estaría dada por la oxidación de la pirita, que se produciría sobre el nivel de aguas metóricas en condiciones de baja temperatura, entorno a los 15°C , y con valores de pH entorno a 1.

6.1.1.3. Edad y orden de ocurrencia de la alteración hidrotermal.

Respecto al orden de ocurrencia de los tipos de alteración, en base al trabajo de terreno y a la caracterización de la mineralogía de alteración, es posible identificar la presencia de azufre y anhídrita en vetillas que cortan a los depósitos glaciales silicificados (Figuras 5-1 y 5-7). Ésto permitiría establecer una relación de temporalidad entre la silicificación y la alteración argílica avanzada, siendo esta última la alteración mas reciente. En el caso de la alteración argílica, debido a que esta se presenta en una zona distante de los campos de fumarolas, entonces no es posible asignarle una temporalidad con respecto al resto de las alteraciones hidrotermales identificadas en volcán Tacora. La edad de la alteración estaría acotada por la edad Pleistoceno Medio de los depósitos glaciales afectados de volcán Tacora.

6.1.2. Formación Oxaya

6.1.2.1. Condiciones de ocurrencia de los eventos de alteración hidrotermal

La alteración desarrollada sobre las lavas de Formación Oxaya se caracteriza por la ocurrencia de alteraciones de tipo propilítica, argílica y argílica avanzada. Así de manera similar al caso de volcán Tacora, se podrían establecer las condiciones físicas, químicas y los procesos que determinan la alteración presente en dicha zona.

Alteración Propilítica

Esta alteración está determinada por la asociación clorita-epidota±calcita±óxidos. Corbett y Leach (1998) señala que la alteración propilítica, caracterizada por la presencia de clorita-epidota-carbonatos, se presentaría bajo condiciones de temperaturas entre 200-260°C y en presencia de un fluido hidrotermal con un valor de pH cercano a neutro, es decir entre 6-8. Por otro lado la ocurrencia de calcita requiere la presencia de CO₂ disuelto en la fase hidrotermal (Simmons y Christenson, 1994). Luego, considerando la asociación mineral de alteración y las condiciones de ocurrencia necesarias para su formación mencionadas por Corbett y Leach (1998), y Simmons y Christenson (1994), entonces se podría sugerir que la alteración propilítica, presente en las lavas de Formación Oxaya, habría ocurrido a temperaturas en el rango 200-260°C, asociada a la presencia de un fluido hidrotermal con un pH cercano a neutro y con presencia de CO₂ como volátil disuelto.

Alteración argílica

Esta alteración está caracterizada por la presencia de cuarzo-illita±sericita±muscovita y por su ocurrencia desde moderada, controlada por vetillas, a pervasiva, alterando todo el volumen de roca y en algunas ocasiones incluso obliterando la textura original de las lavas. En términos de la estimación de las condiciones de formación de dicha alteración, el cuarzo no es un mineral que pueda ser utilizado como geotermómetro, debido a su amplio campo de estabilidad. Sin embargo la ocurrencia de filosilicatos tales como illita, sericita y muscovita, si puede ser utilizada como un indicador de las condiciones de temperatura. Así Corbett y Leach (1998) establece que la ocurrencia illita es frecuente en condiciones de temperatura entre 200-250°C. En el caso de la muscovita, ésta sería estable a temperaturas superiores a 250°C y la sericita se presentaría de manera estable entre la ocurrencia de illita y muscovita. Esta ocurrencia de los filosilicatos sería estable a valores de pH entre 4-6.

Luego, dada la asociación mineral que define la alteración argílica y considerando las condiciones de formación de los filosilicatos presentes, entonces se podría inferir que la alteración argílica presente en Formación Oxaya ocurriría a temperaturas en el rango 200-250°C, y asociado a un fluido ligeramente ácido con valores de pH entre 4-6.

Alteración argílica avanzada

Este tipo de alteración está definido por la asociación mineral cuarzo-alunita±caolinita-jarosita con zunyita como mineral accesorio, y por su ocurrencia de manera pervasiva y en ocasiones controlada por vetillas. Dentro de esta asociación mineral de alteración, la presencia de alunita, jarosita y caolinita está restringida a condiciones de pH en el rango 1-4. Sin embargo esta

asociación tiene varios posibles orígenes, tanto hidrotermal como supérgeno (Rye et al, 1992; Corbett y Leach, 1998; Zimbelman et al, 2005). Este hecho no permite establecer condiciones de temperatura para la ocurrencia de dicha alteración. Sin embargo, dada la ocurrencia de estos minerales como relleno de estructuras tipo *boxwork*, y dado que la alunita presenta un hábito pseudo-acicular, hecho que podría sugerir un origen supérgeno (Rye et al., 1992). Entonces se podría establecer que el origen de la alteración argílica avanzada tendría una componente de tipo supérgena asociada a la oxidación y lixiviación de pirita en condiciones de baja temperatura y pH menor a 4.

Por otro lado se ha identificado la presencia de zunyita en vetillas. Reyes (1990) indica que este mineral se presentaría frecuentemente en condiciones de temperatura de 240-280°C y de bajos valores de pH. Palacio y Godeas (2008) indica que la ocurrencia de zunyita está comúnmente asociada a la presencia de pirofilita y diásporo, que son minerales característicos de alteración argílica avanzada profunda de alta temperatura y con valores de pH inferiores a 4. Esto se correspondería con una actividad hidrotermal asociada al arco volcánico de edad Mioceno Inferior (Huaylillas, Acosta et al., 2011).

Luego dada la ocurrencia de zunyita en las lavas de Formación Oxaya, y considerando las condiciones de formación de dicho mineral. Entonces se podría sugerir que la alteración argílica avanzada presente en Formación Oxaya podría estar compuesta por una componente de origen hidrotermal profunda de alta temperatura (240-280°C) y una componente de origen supérgena, en condiciones de temperaturas ambiental (15°C, García et al., 2004) y con valores de pH menores a 4.

6.1.2.2. Edad y orden de ocurrencia de la alteración hidrotermal.

En base a lo descrito anteriormente, las lavas de Formación Oxaya evidencian la ocurrencia de distintos tipos de alteración. Este hecho genera una problemática en cuanto al orden de ocurrencia de los eventos de alteración. Esto puede ser contestado con la información obtenida de las texturas de las lavas de Formación Oxaya, junto con las posibles condiciones de formación de dichos eventos de alteración.

En el caso de la alteración propilítica se tiene que su ocurrencia no genera una alteración en la textura porfírica de las lavas. Esto difiere de las características texturales que presentan la alteración argílica y argílica avanzada. Este hecho permitiría inferir que esta alteración se habría previa a la ocurrencia del resto de las alteraciones, en condiciones de temperatura de 200-260°C,

y fluidos hidrotermales caracterizados por la presencia de CO₂ como volátil disuelto y con valores de pH cercanos a neutro.

Luego dado que la alteración presenta una variación espacial desde propilítica hasta argílica avanzada, y considerando que esta última tendría una posible componente de origen hidrotermal profunda de alta temperatura (240-280°C). Entonces este hecho se puede interpretar que la alteración presente en las lavas de Formación Oxaya, ha evolucionado desde una alteración inicial de tipo propilítica a temperaturas de 200-260°C, con presencia de fluidos con pH cercano a neutro. Luego a esta alteración se superpone una alteración de tipo argílica avanzada de alta temperatura (240-280°C) y valores de pH entre 1-4. Este evento habría generado un halo de alteración de tipo argílica en la transición con la alteración propilítica previa, en condiciones de temperatura de 200-250°C y con los fluidos ácidos parcialmente neutralizados con valores de pH de 4-6.

Aún cuando no existe una relación de temporalidad entre las componentes hidrotermal y supérgena de la alteración argílica avanzada, se interpreta que la componente supérgena sería posterior debido a que la estructura *boxwork* se observa rellena con óxidos e hidróxidos, los cuales corresponden a una alteración superficial reciente (Figura 6-5).

6.1.2.3. Relación con las manifestaciones termales superficiales.

Como se ha establecido en el área de volcán Tacora, la alteración hidrotermal está relacionada a un ambiente sulfatado-ácido de tipo calentado por vapor, el cual se evidencia en superficie por la presencia de los campos de fumarolas. Por otro lado, las lavas de Formación Oxaya no presentan el desarrollo de manifestaciones termales sobre ellas y las manifestaciones termales próximas corresponden a los manantiales calientes ubicados en la localidad de Aguas Calientes. Estas manifestaciones presentan temperaturas de descarga de 40°C y son consideradas de tipo sulfatadas-ácidas (Risacher y Hauser, 2008). Sin embargo se desarrollan sobre los depósitos aluviales. De esta manera no es posible establecer una relación evidente entre la alteración presente en las lavas de Formación Oxaya y los manantiales calientes de Aguas Calientes.

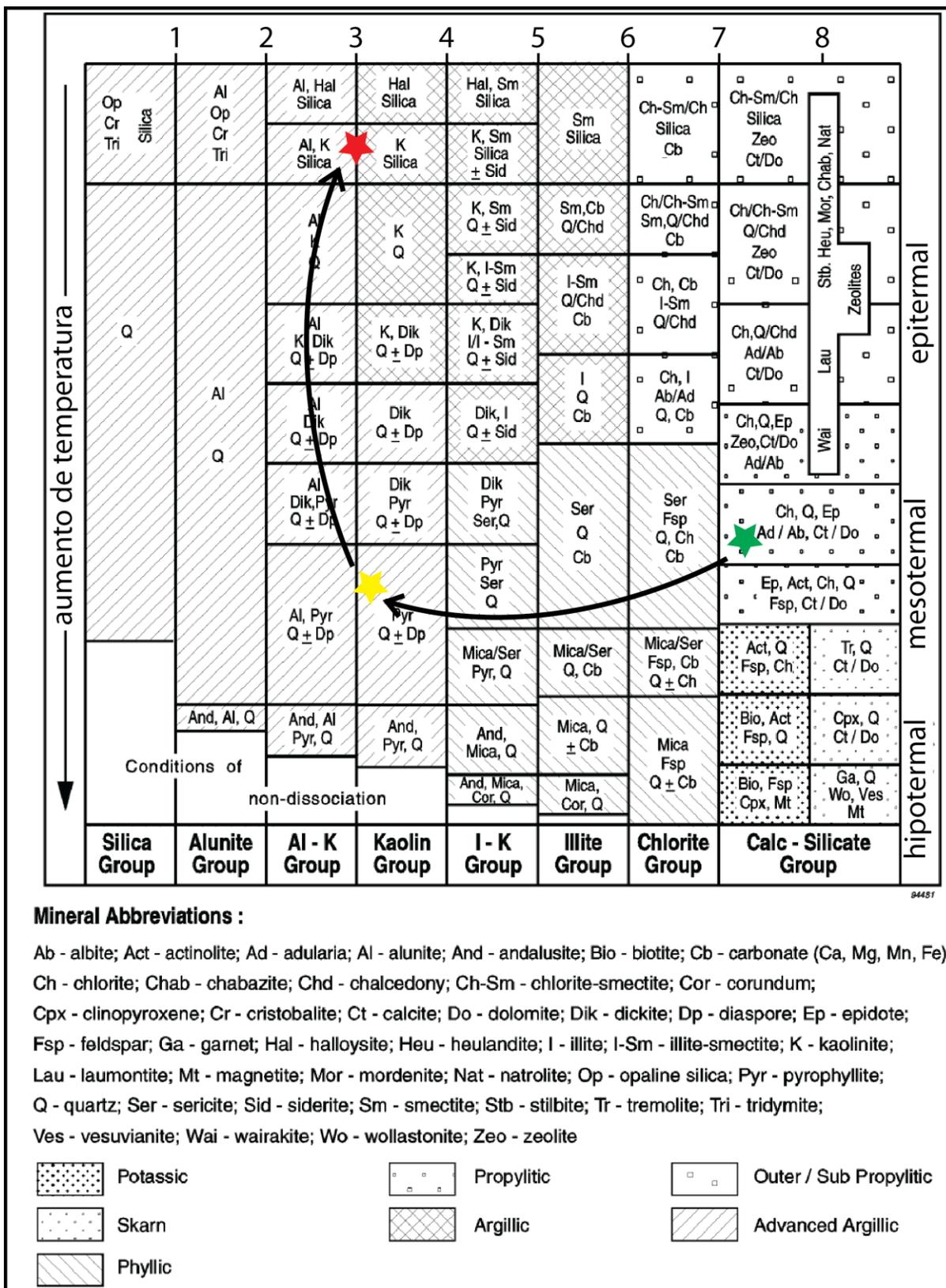


Figura 6-5. Tabla de tipos de alteración hidrotermal, con sus asociaciones minerales características, en función del pH y la temperatura. Modificado de Corbett y Leach (1998). En ésta se muestra la evolución de la alteración que habría afectado a las lavas de Formación Oxya.

6.1.3. Comparación de la alteración presente en volcán Tacora y Formación Oxaya

Dado que se ha discutido respecto a la condiciones de formación de la alteración presente en la superficie de volcán Tacora y Formación Oxaya. Entonces se hace interesante establecer una comparación entre dichas zonas, en términos de las condiciones de formación, origen y edad de la alteración. Esto queda reflejado en la siguiente tabla:

Tabla 3. Comparación de la alteración presente en las zonas de volcán Tacora y Formación Oxaya, en términos de los tipos de alteración, condiciones de formación (T, pH), origen y edad de la alteración.

Zona	Volcán Tacora	Fm. Oxaya
Tipos de alteración	argílica, argílica avanzada y silicificación	propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada
Condiciones de formación (T, pH)	Temperaturas en torno a 100°C a alta tasa de enfriamiento (silicificación y argílica avanzada), y 15°C y pH de 1-2 (argílica intermedia).	200-260°C, pH de 6-8 (propilítica); 250-280°C, pH de 1-4 (argílica avanzada de alta temperatura), y a 15°C con pH de 1-4.
Origen	Interacción de fluidos sulfatados con aguas meteóricas someras con posible componente de origen magmático, y supérgeno.	Hidrotermal profundo y supérgeno.
Edad	Pleistoceno Medio	Mioceno Inferior

De la tabla se desprende que ambas zonas han sufrido distintos tipo de alteración hidrotermal. Sin embargo existen diferencias en la dinámica de las condiciones de formación de dichas alteraciones. Por un lado la alteración superficial presente en volcán Tacora, en términos generales, sería producto de la interacción de fluidos sulfatados con aguas meteóricas someras a temperaturas alrededor de 100°C. En el caso de Formación Oxaya, la alteración hidrotermal en superficie sería producto de una evolución en las condiciones de temperatura y pH de los fluidos hidrotermales, debido a la superposición de una alteración argílica avanzada de alta temperatura por sobre una alteración de tipo propilítica Figura (6-6).

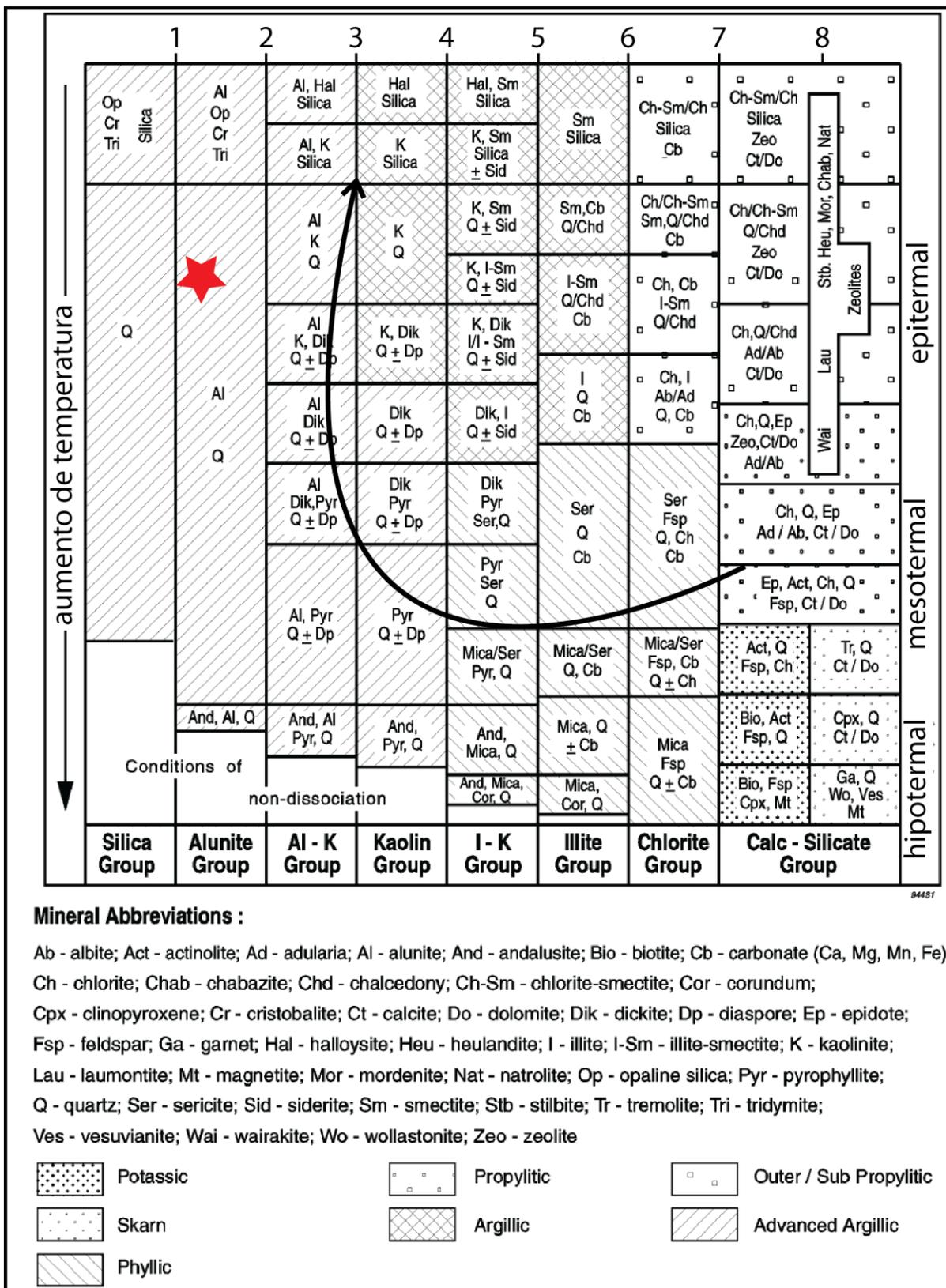


Figura 6-6. Tabla de tipos de alteración hidrotermal, con sus asociaciones minerales características, en función del pH y la temperatura. Modificado de Corbett y Leach (1998). En ésta se muestra con una flecha negra la evolución de la alteración en las lavas de Formación Oxaya, y en estrella roja se indica las condiciones de temperatura y pH que caracterizan a la alteración presente en volcán Tacora.

Respecto a la edad de ocurrencia de los eventos de alteración, con la información disponible solo es posible acotar la edad de ocurrencia de dichas alteraciones por la edad de las unidades afectadas por alteración hidrotermal. De esta manera la alteración en volcán Tacora tiene una edad máxima de Pleistoceno Superior, dada por la edad de los depósitos glaciales presentes en los flancos del edificio volcánico. Para el caso de Formación Oxaya, la edad del comienzo de la alteración sería Mioceno Inferior. Sin embargo, basado en la mineralogía identificada en las rocas afectadas por alteración argílica y argílica avanzada, sería pertinente realizar una datación K-Ar en alunita, muscovita o illita.

6.2. Resultados del análisis de alteración mediante sensores remotos

En base a los resultados obtenidos en el mapa preliminar de minerales de alteración y comparándolos con los resultados obtenidos mediante la caracterización de la mineralogía de alteración en la zona de estudio, es posible señalar algunos aspectos respecto a la efectividad de la metodología utilizada.

Se observa una anomalía en los resultados, debido a la identificación de una zona de alteración argílica avanzada sobre el salar Laguna Blanca. Esto constituye un resultado erróneo el cual podría estar relacionado con el orden de ingreso de las condiciones en los distintos nodos que componen el árbol de clasificación.

En el caso de la alteración de presente en la superficie de volcán Tacora, no se observa una correspondencia entre la mineralogía identificada en laboratorio y la mineralogía seleccionada en la metodología. Sin embargo, se observa una correlación entre la naturaleza de los tipos de alteración identificados en terreno y las zonas de alteración detectadas. Luego esta metodología parecer mostrar buenos resultados como herramienta de identificación de zonas de alteración a escala regional, en donde no es de primera necesidad la identificación de la mineralogía de alteración detallada.

7. Conclusiones

En base a análisis de imágenes satelitales, el trabajo de terreno, la caracterización petrográfica y los resultados de DRX se ha podido caracterizar la mineralogía presente en las zonas de alteración ubicadas en el área de volcán Tacora.

Estas zonas se separan en aquellas que se desarrollan en volcán Tacora y las que se desarrollan en la Formación Oxaya. En el caso de volcán Tacora las zonas de alteración corresponden a los campos de fumarolas que se desarrollan sobre los depósitos glaciales y coluviales ubicados en los flancos Oeste, Noroeste, cráter y sector Noreste. Mientras que en Formación Oxaya, la alteración se desarrolla sobre afloramientos de lavas de naturaleza andesítica a dacítica ubicadas al Oeste y Suroeste de la zona de estudio.

Respecto a la mineralogía, las zonas de alteración ubicadas en volcán Tacora se caracterizan por la presencia distintas asociaciones: (1) cuarzo-cristobalita±tridimita±ópalo-A la cual define una alteración de tipo silicificación en condiciones de $\text{pH} < 2$ y temperaturas menores a 100°C y de alta tasa de enfriamiento (2) azufre, cristobalita-jarosita±anhidrita/yeso como alteración argílica avanzada la cual se formaría en una ambiente sulfatado-ácido de tipo calentado por vapor, en condiciones de temperatura de 100°C y con valores de pH entorno a 1, posiblemente con una componente de origen magmático-hidrotermal. (3) esmectita-jarosita-pirita como alteración argílica de origen supérgeno, en condiciones de pH entorno a 1 y temperaturas de 15°C . Todas estas alteraciones se relacionarían con la interacción de fluidos sulfatados con aguas meteóricas someras ubicadas en el sector superior de Volcán Tacora.

En el caso de Formación Oxaya, las asociaciones minerales identificadas corresponderían a: (4) clorita-epidota±calcita±óxidos±pirita como alteración propilítica que se formaría a temperaturas de $200\text{-}260^\circ\text{C}$ en condiciones de pH cercano a neutro y con presencia de CO_2 como fase volátil dentro de los fluidos hidrotermales. (5) cuarzo-alunita±caolinita-jarosita y zunyita como alteración argílica avanzada. Esta alteración podría tener como origen una componente hidrotermal profunda a temperaturas de $240\text{-}280^\circ\text{C}$ y pH de 1-4, y una componente supérgena a temperaturas de 15°C y similares condiciones de pH . (6) cuarzo-illita±sericita±muscovita como alteración argílica, que se formaría como un halo de la alteración argílica avanzada, a temperaturas de $200\text{-}250^\circ\text{C}$ y valores de pH de 4-6.

Finalmente esta ocurrencia y distribución de la mineralogía de alteración permite generar un modelo conceptual de la evolución de la alteración presente en la superficie de la zona de estudio.

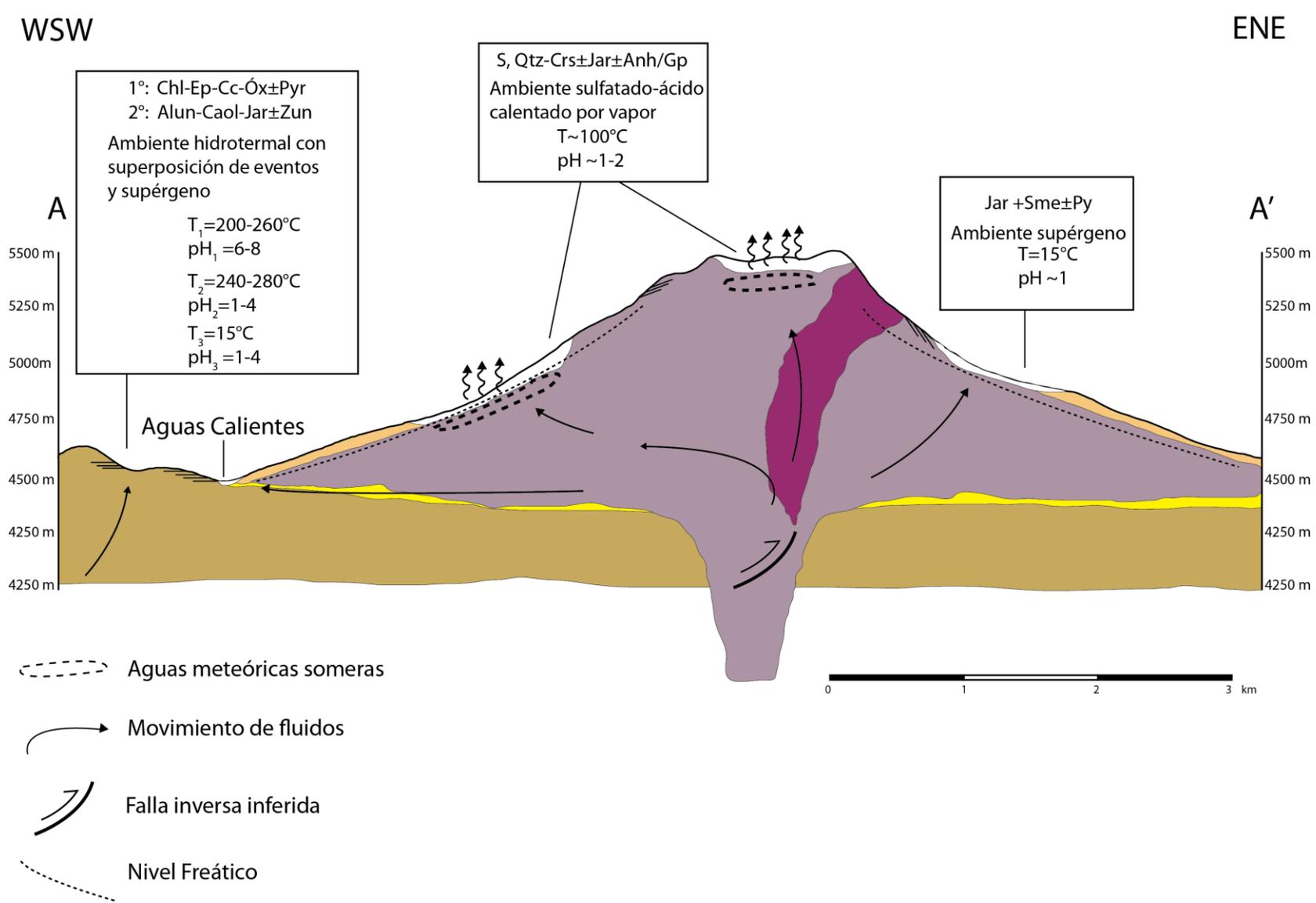


Figura. 7-1. Perfil geológico del área de volcán Tacora. En este se muestra la ocurrencia y distribución de las zonas de alteración en la zona de estudio destacándose las asociaciones minerales y condiciones de formación de la alteración en términos de temperatura y pH.

8. Recomendaciones

Se recomienda realizar una datación de las lavas de volcán Tacora, con el objetivo de obtener un dato confiable respecto a la edad de la unidad Volcán Tacora.

Así también se recomienda hacer un estudio de isotopía estable ($\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ y δD) en sulfatos y sulfuros, presentes en las zonas de alteración de volcán Tacora con el propósito de verificar el posible origen de los fluidos sulfatados que determinan la alteración presente en el edificio volcánico.

Adicionalmente se recomienda realizar un estudio de isotopía estable en la alteración argílica avanzada presente en las lavas de Formación Oxaya, con el objetivo de confirmar la presencia de una componente de origen supérgeno en la formación de dicha alteración. También se recomienda realizar una datación K-Ar en alunita, mica hidrotermal potásica (e.g. muscovita) o arcilla hidrotermal del mismo tipo, a fin de datar la edad de la alteración argílica avanzada.

Y finalmente se recomienda realizar estudios de alteración hidrotermal en profundidad, y compararlos con los resultados obtenidos en este informe. De esta manera se podría entender de mejor manera los procesos ocurridos en profundidad que generan la alteración presente en la zona de estudio.

9. Bibliografía

- Acosta, H., Alván, A., Mamani, M., & Oviedo, M. (2011). *Geología de los Cuadrángulos de Pachía y Palca. Hojas 36-v y 36-x. Bol.139 Carta. Geol.Nac.* Lima: INGEMMET.
- Aguilera, F. (2008). *Tesis de Doctorado "Origen y Naturaleza de los fluidos en los sistemas volcánicos, geotermales y termales de baja entalpía de la zona volcánica central (ZVC) entre los 17°43'S y 25°10'S"*. Antofagasta: Universidad Católica de Antofagasta.
- Amman, C., Jenny, B., Kammer, K., & Messerli, B. (2001). Late Quaternary glacier response to humidity changes in the arid Andes of Chile (18°-29°S). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 313-326.
- Biblioteca Congreso Nacional de Chile. (2007). *Sistema Integrado de Información Territorial*. Obtenido de <http://siit2.bcn.cl/nuestropais/region15/clima.htm>
- Bird, D. K., Schiffman, P., Elders, W. A., William, A. E., & McDowell, S. D. (1984). Calc-Silicate mineralization in active geothermal systems. *Economic Geology*, 671-695.
- Browne, P. (1984). Lectures on geothermal geology and petrology. *UNU Geothermal Training Programme*. Reykjavik: National Energy Authority.
- Browne, P. (1991). Mineralogical guides to interpreting the shallow paleohydrology of epithermal mineral depositing environments. *Proceedings of New Zealand Geothermal Workshop*, (págs. 263-269). Nueva Zelandia.
- Capaccioni, B., Aguilera, F., Tassi, F., Darrah, T., Poreda, R., & Vaselli, O. (2011). Geochemical and isotopic evidences of magmatic inputs in the hydrothermal reservoir feeding the fumarolic discharges of Tacora volcano (northern Chile). *Journal of Volcanology and Geothermal Research No.208*, 77-85.
- Charrier, R., Farías, M., & Maksaev, V. (2009). Evolución tectónica, paleogeografía y metalogénica durante el cenozoico en los Andes de Chile Norte y Central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina Vol.65 (1)*, 5-35.
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodriguez, M. P. (2007). Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En T. Moreno, & W. Gibbons, *The Geology of Chile* (págs. 21-115). London: The Geological Society.
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization*. Society of Economic Geologist, Special Publication Number 6.
- David, A., Audin, L., Tavera, H., & Hérial, G. (2004). Sismicidad cortical y fallas recientes en el sur del Perú. *Resúmenes extendidos del XII Congreso Peruano de Geología, Public. Esp. N°6* (págs. 290-293). SGP.
- de Silva, S. L., & Francis, P. (1991). *Volcanoes of Central Andes*. Berlín: Springer Verlag.

- Dorbath, C., Paul, A., & Group, L. A. (1996). Tomography of the Andean crust and the mantle at 20°S: first results of the Lithoscope experiment. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Vol.97, 133-144.
- Farías, M., Charrier, R., Comte, D., Martinod, J., & Hérail, G. (2005). Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from the depositional, tectonic, and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19°30'S). *Tectonics* Vol.24, TC4001, doi:10.1029/2004TC001667.
- Flores, A., Acosta, J., Bedoya, C., & Sempere, T. (2005). Oligocene-Neogene tectonics and sedimentation in the forearc of Southern Peru, Tacna area (17.5°-18.5°). *6th International Symposium on Andean Geodynamics* (págs. 269-272). Barcelona: ISAG.
- García, M. (2011). *Reconocimiento geológico preliminar del área del Volcán Tacora, Región de Arica y Parinacota*. Santiago: AMTC.
- García, M., Gardeweg, M., Clavero, J., & Hérail, G. (2004). *Carta Geológica de Chile. Hoja Arica, Región de Tarapacá. No.84*. Santiago: SERNAGEOMIN.
- Gaupp, R., Kött, A., & Wörner, G. (1999). Paleoclimatic implications of Mio-Pliocene sedimentation in the high-altitude intra-arc Lauca Basin of Northern Chile. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* Vol.151, 79-100.
- Gonzalez-Ferrán, O. (1995). *Volcanes de Chile*. Santiago: Instituto Geográfico Militar.
- Gutscher, M.-A. (2002). Andean subduction styles and their effect on thermal structure and interplate coupling. *Journal of South American Sciences* vol.15, 3-10.
- Henríquez, H. (1963). *Memoria de Título: Reconocimiento geológico en el extremo Norte del Departamento de Arica*. Santiago: Departamento de Geología.
- Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Brewer, J., Ramos, V., & Ando, C. (1983). Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America Bulletin*, Vol.94, 341-361.
- Lahsen, A. (1988). Chilean geothermal resources and their possible utilization. *Geothermics* Vol.17, No 2-3, 401-410.
- Lahsen, A., Muñoz, N., & Parada, M. A. (2010). Geothermal Development in Chile. *Proceedings World Geothermal Congress*. Bali, Indonesia.
- Lattus, J. (2011). GL60G-1 Seminario de Imágenes Satelitales. Departamento de Geología - Universidad de Chile.
- Marini, L. (2000). Geochemical Techniques for Exploration and Exploitation of Geothermal Energy. *Informe de Proyecto FONDEF 9911051*, 82.
- Montecinos, F. (1963). *Observaciones de Geología en el Cuadrángulo de Campanani, Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Memoria de Título*. Santiago: Departamento de Geología.

- Montecinos, F. (1970). *Geología del yacimiento de Azufre del Volcán Tacora vol.25*. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Muñoz, N. (1988). *Estratigrafía y Paleontología de la Formación Blanco (Aptiano) y Formación Lauca (Mioceno), I Región. Informe Inédito*. Santiago: ENAP, Proyectos de exploración fuera de Magallanes.
- Nicholson, K. (1993). *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Springer Verlag.
- Palacio, M. d., & Godeas, M. (2008). *Guía de minerales de alteración de la República Argentina. Serie Publicaciones N°169*. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR.
- Pirajno, F. (2009). *Hydrothermal process and mineral systems*. Geological Survey of Australia, Perth, Australia: Springer.
- Reyes, A. G. (1990). Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research No. 43*, 279-309.
- Risacher, F., & Hauser, A. (2008). *Catastro de las principales fuentes de aguas termales de Chile*. Santiago: SERNAGEOMIN.
- Rowan, L., & Hook, S. (2003). Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a New Satellite-Imaging System. *Economic Geology*, 1019-1027.
- Rye, R. O., Bethke, P. M., & Wasserman, M. D. (1992). The stable isotope geochemistry of acid sulfate alteration. *Economic Geology No.87*, 225-262.
- Salas O., R., Kast, R. F., Montecinos P., F., & Salas Y., I. (1966). *Geología y recursos minerales del Departamento de Arica: Provincia de Tarapacá Vol.21*. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas 114 p.
- Simmons, S. F., & Christenson, B. W. (1994). Origins of calcite in boiling geothermal system. *American Journal of Science Vol.294*, 361-400.
- Stern, C. R. (2004). Active Andean volcanism: its geologic and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile Vol.31. No.2*, 161-206.
- Stern, C. R., Moreno, H., López-Escobar, L., Clavero, J. E., Lara, L. E., Naranjo, J. A., Parada, M.A., Skewes, M. A. (2007). Chilean volcanoes. En T. Moreno, & W. Gibbons (eds), *The Geology of Chile* (págs. 147-178). London: The Geological Society.
- Swamy, V., Saxena, S. K., Sundman, B., & Zhang, J. (1994). A thermodynamic assessment of silica phase diagram. *Journal of Geophysical Research Vol.99*, 787-794.

Thompson, A. J., & Thompson, J. F. (1996). *Atlas of Alteration-A field and Petrographic guide to Hydrothermal alteration minerals*. Vancouver, Canada: Geological Association of Canada-Mineral deposits Division.

Viteri, E. (1974). *Cuadrángulos Villa Industrial y Río Azufre (Informe Inédito)*. 1 mapa escala 1:50.000. Arica: Instituto de Investigaciones Geológicas.

Wörner, G., Hammerschmidt, K., Henjes-Kunst, F., Lezaun, J., & Wilke, H. (2000). Geochronology ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K-Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from Northern Chile (18°-22°S): Implications for magmatism and tectonic evolution of the Central Andes. *Revista Geológica de Chile*, 205-240.

Zimbelman, D. R., Rye, R. O., & Breit, G. N. (2005). "Origin of secondary sulfate minerals on active andesitic stratovolcanoes" *Geochemistry of Sulfate Minerals: A tribute to Robert O. Rye*. *Chemical Geology*, 37-60.

Anexo A: Ubicación de las muestras

Pto. Muestreo	UTM Este	UTM Norte	Ubicación	Muestras	Tipo de descripción
1.1.1	413976	8036990	Fm. Oxaya (Centro)	1.1.1	Macro, microscópica
1.1.2	413913	8036986	Fm. Oxaya (Centro)	1.1.2	Macro, microscópica
1.1.3	413910	8036974	Fm. Oxaya (Centro)	1.1.3	Macro
1.1.4	413930	8036953	Fm. Oxaya (Centro)	1.1.4	Macro, microscópica
1.1.5	414090	8036837	Fm. Oxaya (Centro)	1.1.5	Macro, XRD
1.2.1	414388	8035777	Fm. Oxaya (Sur)	1.2.1	Macro, microscópica
1.2.2	414436	8035806	Fm. Oxaya (Sur)	1.2.2	Macro, XRD
1.2.3	414538	8036820	Fm. Oxaya (Sur)	1.2.3.A	Macro, XRD
1.2.4	414732	8035860	Fm. Oxaya (Sur)	1.2.4.A	Macro, microscópica
1.2.5	414925	8035884	Fm. Oxaya (Sur)	1.2.5.A	Macro, microscópica
2.1.1	415029	8040947	Vn. Tacora (Campo O)	2.1.1.A; 2.1.1.B	Macro, microscópica
2.1.2	415215	8040775	Vn. Tacora (Campo O)	2.1.2; 2.1.2.A	Macro, XRD
2.1.3	415228	8040744	Vn. Tacora (Campo O)	2.1.3.A	Macro, microscópica
2.1.4	415222	8040750	Vn. Tacora (Campo O)	2.1.4.A	Macro
2.1.5	415040	8040987	Vn. Tacora (Campo NO)	2.1.5	Macro, XRD
2.2.1	415741	8042905	Vn. Tacora (Campo NO)	2.2.1.A	Macro, microscópica
2.2.2	415801	8042929	Vn. Tacora (Campo NO)	2.2.2.A, 2.2.2.B	Macro, microscópica
2.3.1	416308	8043109	Vn. Tacora (Campo NO)	2.3.1.A	Macro, microscópica
3.2.1	416231	8042491	Vn. Tacora (Campo NO)	3.2.1.A; 3.2.1.B	Macro, XRD
3.3.1	416926	8041581	Vn. Tacora (Sector S cráter)	3.3.1.A, 3.3.1.B	Macro, microscópica, XRD
3.3.2	417254	8042049	Vn. Tacora (Sector N cráter)	3.3.2.A; 3.3.2.B; 3.3.2.D.1; 3.3.2.E; 3.3.2.G.2; 3.3.2.H.1; 3.3.2.RX	Macro, microscópica, XRD
3.4.1	417473	8042927	Vn. Tacora (Sector Noreste)	3.4.1.A; 3.4.1.B; 3.4.1.C	Macro, microscópica
OX	412802	8039986	Fm. Oxaya (Norte)	OX1; OX2	Macro
OXB	412812	8039555	Fm. Oxaya (Norte)	OXB1; OXB2	Macro

Anexo B: Descripción de mineralogía de alteración

Muestra:	1.1.1	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructuras:	<i>boxwork</i> con alunita, jarosita, caolinita y hematita.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (70%)	como reemplazo de masa fundamental en masa micro-cristalina con textura <i>jigsaw puzzle</i> .		
alunita (20%)	en estructura <i>boxwork</i> , como agregados tabulares subhedrales, junto con jarosita y caolinita.		
jarosita (5%)	rellenando espacios en <i>boxwork</i> , como agregados micro-cristalinos.		
caolinita (3%)	entrecrecido con alunita en estructura <i>boxwork</i> , como agregados micro-cristalinos.		
hematita (2%)	Como relleno de estructura <i>boxwork</i> , en agregados cristalinos finos.		

Muestra:	1.1.2	Textura:	porfírica.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructuras:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (70%)	como reemplazo de masa fundamental en masa micro-cristalina con textura <i>jigsaw puzzle</i> , ocasionalmente junto con sericita como alteración de feldespatos.		
sericita (25%)	como alteración de feldespatos, como agregados micro-cristalinos.		
hematita (3%)	como pátinas de alteración superficial.		
goethita (2%)	como pátinas de alteración superficial, junto con hematita.		

Muestra:	1.1.3	Textura:	porfírica.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructuras:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (75%)	como reemplazo de masa fundamental en masa micro-cristalina.		
caolinita (10%)	como alteración superficial de feldespatos como agregados finos.		
hematita (5%)	como pátina de alteración superficial.		

Muestra:	1.1.4	Textura:	porfírica de grano fino.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructuras:	vetilla de hematita.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (50%)	como reemplazo de masa fundamental en masa micro-cristalina con textura <i>jigsaw puzzle</i> .		
sericita (20%)	como alteración de feldespatos en agregados cristalinos de grano fino disseminados.		
hematita (3%)	como pátinas de alteración superficial y como relleno de vetilla.		
goethita (2%)	como pátinas de alteración superficial, junto con hematita.		

Muestra:	1.1.5	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (lava)	Estructuras:	<i>boxwork</i> con hematita.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (60%)	como reemplazo de masa fundamental como masa micro-cristalina y en menores cantidades como relleno de espacios junto con illita.		
illita (25%)	como reemplazo de feldespatos o como relleno de espacios (ver Anexo C).		
goethita (5%)	como pátina de alteración superficial, junto con hematita.		
hematita (5%)	como pátinas de alteración superficial y en estructura <i>boxwork</i> como agregados cristalinos finos.		

Muestra:	1.2.1.A	Textura:	porfírica; bordes de desequilibrio en fenocristales de biotita.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructuras:	<i>boxwork</i> con goethita, vetilla de cuarzo.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (65%)	como reemplazo de masa fundamental en masa micro-cristalina con textura <i>jigsaw puzzle</i> , como reemplazo de feldespatos en cristales subhedrales junto con sericita. Como relleno de vetilla en agregados de grano medio.		
sericita (25%)	como producto de alteración de feldespatos y biotita en agregados cristalinos finos, junto con cuarzo.		
goethita (5%)	como pátina de alteración superficial y en estructura <i>boxwork</i> como agregados micro-cristalinos.		
óxidos (opacos) (5%)	como alteración de biotita en agregados cristalinos finos.		

Muestra:	1.2.2	Textura:	porfírica.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructura:	vetillas de cuarzo-muscovita.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (60%)	como reemplazo de masa fundamental en masa micro-cristalina con textura <i>jigsaw puzzle</i> , y como relleno de vetillas junto con muscovita.		
muscovita (25%)	como relleno de vetillas en agregados micro-cristalinos y como producto de alteración de feldespatos (ver Anexo C).		
caolinita (15%)	como alteración superficial en agregados terrosos.		

Muestra:	1.2.3.A	Textura:	obliterada
Tipo de Roca:	volcánica (lava)	Estructura:	vetillas con cuarzo-muscovita-zunyita-jarosita.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (50%)	como reemplazo de masa fundamental en masa micro-cristalina y como relleno de vetillas.		
muscovita (30%)	como relleno de vetillas en agregados micro-cristalinos (ver Anexo C).		
zunyita (5%)	como relleno de vetillas en agregados micro-cristalinos.		
caolinita (10%)	como relleno de vetillas en agregados micro-cristalinos y como alteración superficial en agregados terrosos.		
jarosita (5%)	como relleno de vetillas, junto con cuarzo, muscovita, zunyita y caolinita.		

Muestra:	1.2.4.A	Textura:	porfírica; bordes de desequilibrio en fenocristales de biotita.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructura:	vetilla de cuarzo, vetilla de pirita.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
clorita (30%)	como producto de alteración de plagioclasas y biotita en agregados micro-cristalinos.		
epidota (20%)	como producto de alteración de plagioclasas en agregados cristalinos de grano fino a medio, frecuentemente junto a clorita.		
cuarzo (5%)	como relleno de vetillas en agregados micro-cristalinos subhedrales.		
óxidos (opaco) (2%)	como alteración de masa fundamental, plagioclasas y como bordes de alteración de biotita en agregados cristalinos subhedrales a euhedrales.		
pirita (<1%)	como relleno de vetilla.		

Muestra:	1.2.5.A	Textura:	porfírica.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructura:	vetilla de cuarzo-calcita, vetilla de hematita (posterior).
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
clorita (20%)	como producto de alteración de plagioclasas y feldespatos en agregados micro-cristalinos, frecuentemente junto a epidota, calcita y óxidos.		
epidota (20%)	como producto de alteración de plagioclasas y feldespatos en agregados cristalinos de grano fino a medio.		
calcita (3%)	como producto de alteración de plagioclasas y feldespatos en cristales de grano fino, y como relleno de vetilla junto con cuarzo.		
cuarzo (2%)	como relleno de vetilla en agregados cristalinos subhedrales de grano fino, junto con calcita.		
óxidos (opacos) (2%)	como producto de alteración de plagioclasas y la masa fundamental en cristales subhedrales, de grano fino, diseminados en la masa fundamental.		
hematita (2%)	como pátina de alteración superficial y rellenando una vetilla.		

Muestra:	2.1.1.A	Textura:	porfírica; bordes de desequilibrio en fenocristales de clinopiroxenos.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita de clinopiroxeno)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
óxidos (opacos) (3%)	como bordes de alteración de clinopiroxenos en agregados cristalinos subhedrales de grano muy fino		

Muestra:	2.1.2	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (100%)	como reemplazo de la masa fundamental en agregados masivos de color blanco y alta dureza		

Muestra:	2.1.2.A	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita de clinopiroxeno)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (80%)	como reemplazo pervasivo de la roca en agregados masivos de tonos grises y alta dureza.		
azufre (20%)	como producto de depositación rellenando fracturas y espacios en agregados cristalinos finos (ver Anexo C).		

Muestra:	2.1.3.A	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (60%)	como alteración pervasiva de la roca en agregados cristalinos de grano fino subhedrales, en ocasiones junto con jarosita.		
jarosita (2%)	como agregados cripto-cristalinos junto con cuarzo en agregados cristalinos subhedrales de grano fino.		
hematita (2%)	como pátinas de alteración superficial.		
goethita (3%)	como pátinas de alteración superficial.		

Muestra:	2.1.4.A	Textura:	-
Tipo de Roca:	sedimentaria química	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
yeso (97%)	posiblemente como producto de alteración de anhidrita (hidratación). En agregados terrosos blancos de baja dureza.		
goethita (3%)	como producto de alteración superficial.		

Muestra:	2.1.5	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (lava)	Estructura:	veta y vetillas con fases silíceas.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (80%)	como alteración pervasiva de la roca en agregados masivos, y como relleno de vetillas junto con cristobalita y tridimita.		
cristobalita (10%)	como relleno de vetillas en agregados micro-cristalinos, junto con tridimita.		
tridimita (10%)	como relleno de vetillas en agregados micro-cristalinos (ver Anexo C).		

Muestra:	2.2.1.A	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (70%)	como producto de alteración pervasiva de la roca en agregado masivos de grano fino sub-hedrales.		
jarosita (2%)	como agregados cripto-cristalinos junto con cuarzo en agregados cristalinos subhedrales de grano fino.		
azufre (15%)	como producto de depositación rellenando fracturas en agregados cristalinos euhedrales.		

Muestra:	2.2.2.A	Textura:	porfírica; traquítica.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita de anfíbola y biotita)	Estructura:	vetillas de hematita.
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
hematita (5%)	como relleno de vetillas y pátinas de alteración superficial.		

Muestra:	2.2.2.B	Textura:	porfírica, parcialmente alterada.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita de anfíbola y biotita)	Estructura:	vetilla de anhidrita-yeso.

Mineral de alteración:	Ocurrencia:
anhidrita (3%)	como relleno de vetillas en agregados cripto-cristalinos a cristalinos tabulares aciculares.
yeso (2%)	como producto de hidratación de la anhidrita en agregados cristalinos de grano fino.
jarosita (2%)	como agregados cripto-cristalinos subhedrales diseminados en la roca.
azufre (10%)	como producto de depositación rellenando espacios en agregados cristalinos de grano fino.

Muestra:	2.3.1.A	Textura:	porfírica.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita de biotita)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
hematita (5%)	como pátina de alteración superficial y como relleno de vetilla.		

Muestra:	3.2.1.A	Textura:	porfírica; bordes de desequilibrio en fenocristales de biotita.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita de biotita y anfíbola)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
óxidos (opacos) (3%)	en bordes de alteración de biotita como agregados cristalinos subhedrales a euhedrales.		

Muestra:	3.2.1.B	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (lava)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (80%)	como reemplazo de la masa fundamental en agregado masivo.		
crystalita (10%)	como reemplazo de fenocristales de plagioclasas en agregados cristalinos de grano fino de color blanco, junto con ópalo-A.		
ópalo-A (10%)	como reemplazo de fenocristales de plagioclasas (ver Anexo C).		

Muestra:	3.3.1.A	Textura:	porfírica; seriada, bordes de oxidación en fenocristales.
-----------------	---------	-----------------	---

Tipo de Roca:	volcánica (andesita de biotita)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (40%)	como reemplazo de masa fundamental en masas cripto-cristalinas.		
jarosita (2%)	como alteración de feldespatos en agregados cristalinos subhedrales de grano fino.		
óxidos (opacos) (3%)	como bordes de alteración de biotitas en agregados cristalinos subhedrales.		

Muestra:	3.3.1.B	Textura:	piroclástica.
Tipo de Roca:	volcánica (toba vítrea)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
azufre (40%)	como reemplazo pervasivo de la matriz en agregados masivos y cristalinos (ver Anexo C).		
cuarzo (60%)	como agregados poli-cristalinos de grano fino subhedrales diseminados en la roca.		

Muestra:	3.3.2.A	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (toba)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
azufre (75%)	como reemplazo pervasivo de la matriz en agregados masivos y cristalinos.		
cuarzo (20%)	como agregados micro-cristalinos subhedrales diseminados en la roca, se presenta junto con jarosita.		
jarosita (2%)	como agregados criptocristalinos diseminados en la muestra, se presenta junto con cuarzo.		

Muestra:	3.3.2.B	Textura:	porfírica; seriada.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita de clinopiroxeno)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		

óxidos (opacos) (3%)	como bordes de alteración de clinopiroxenos en agregados cristalinos de grano fino subhedrales.
----------------------	---

Muestra:	3.3.2.D	Textura:	obliterada; de flujo con cristales de azufre.
Tipo de Roca:	volcánica (toba)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
azufre (75%)	como reemplazo pervasivo de la matriz en agregados cristalinos tabulares subhedrales con textura de flujo.		
cuarzo (20%)	como agregados cristalinos de grano fino subhedrales diseminados en la roca, en ocasiones junto con jarosita.		
jarosita (2%)	como bordes de alteración de feldespatos relictos en agregados criptocristalinos diseminados en la roca.		

Muestra:	3.3.2.E	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (toba vítrea)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
azufre (80%)	como reemplazo pervasivo de la matriz en agregados cristalinos tabulares subhedrales con textura de flujo.		
cuarzo (15%)	como agregados cristalinos de grano fino subhedrales diseminados en la roca, en ocasiones junto con jarosita.		
jarosita (2%)	como producto de alteración de feldespatos relictos en agregados criptocristalinos diseminados en la roca.		

Muestra:	3.3.2.G	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (toba)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
azufre (90%)	como reemplazo pervasivo de la matriz en agregados masivos y cristalinos.		
crystalita (10%)	como agregados cristalinos de grano fino diseminados en la roca (ver Anexo C).		

Muestra:	3.3.2.RX	Textura:	obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (toba)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
azufre (70%)	como reemplazo pervasivo de la matriz en agregados masivos y cristalinos.		
cristobalita (10%)	como agregados cristalinos de grano fino diseminados en la roca (ver Anexo C).		

Muestra:	3.4.1.A	Textura:	piroclástica fragmental.
Tipo de Roca:	volcánica (toba cristalina)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (40%)	como silicificación de cristales de feldespatos en agregados cristalinos subhedrales de grano fino a medio, en ocasiones se presenta junto con esmectita.		
esmectita (20%)	como alteración de feldespatos relictos y de la matriz en agregados criptocristalinos.		
pirita (<1%)	cristales subhedrales de grano fino diseminados en la roca parcialmente alterados.		
jarosita (1%)	como agregados criptocristalinos diseminados.		

Muestra:	3.4.1.C	Textura:	piroclástica fragmental.
Tipo de Roca:	volcánica (toba cristalina)	Estructura:	-
Mineral de alteración:	Ocurrencia:		
cuarzo (calcedonia) (30%)	como producto de la desvitrificación de la matriz en agregados criptocristalinos con textura esferulítica.		
esmectita (20%)	como producto de la alteración de la matriz, junto con cuarzo, en agregados criptocristalinos diseminados en la roca.		
pirita (1%)	como cristales aislados subhedrales de grano fino diseminados en la roca.		

Muestra:	OX1	Textura:	porfírica de grano fino.
Tipo de Roca:	volcánica (dacita de biotita)	Estructura:	vetilla de cuarzo.

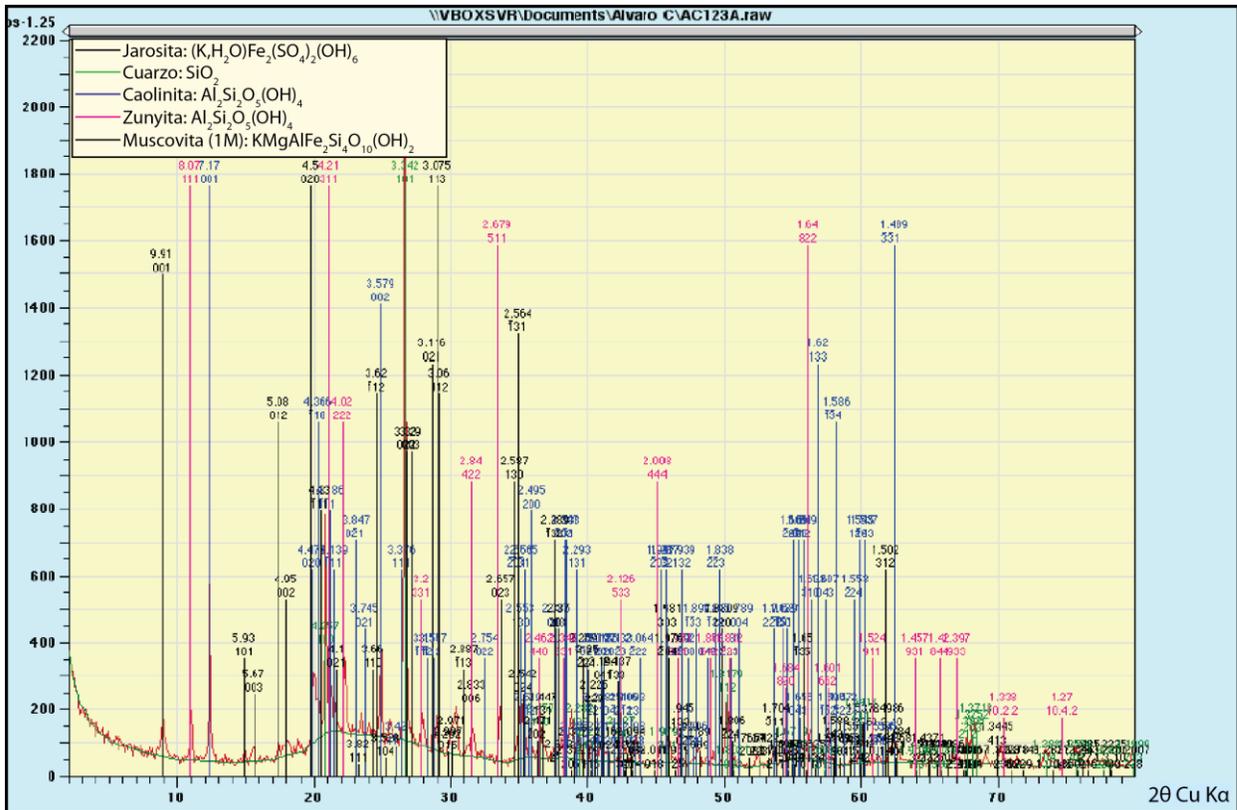
Mineral alteración:	de	Ocurrencia:
clorita (40%)		como producto de alteración de feldespatos y de la masa fundamental en agregados cristalinos masivos.
epidota (20%)		como producto de alteración de feldespatos en agregados cristalinos de grano muy finos, frecuentemente junto con clorita y calcita.
calcita (3%)		como producto de alteración de feldespatos en masas cristalinas de grano muy fino.
cuarzo (2%)		como relleno de vetilla en agregado cristalino de grano muy fino.
goethita (3%)		como pátina de alteración superficial.
pirita (<1%)		Como masas granulares, de grano muy fino, diseminadas en la roca.

Muestra:	OXB1	Textura:	porfírica de grano fino.
Tipo de Roca:	volcánica (andesita)	Estructura:	vetilla de pirita.
Mineral alteración:	de	Ocurrencia:	
clorita (30%)			como producto de alteración de masa fundamental en agregados cristalinos diseminados.
caolinita (5%)			como alteración superficial en agregados terrosos, junto con goethita.
goethita (3%)			como pátina de alteración superficial de la roca.
pirita (<1%)			como relleno de vetilla en masas micro-cristalinas.

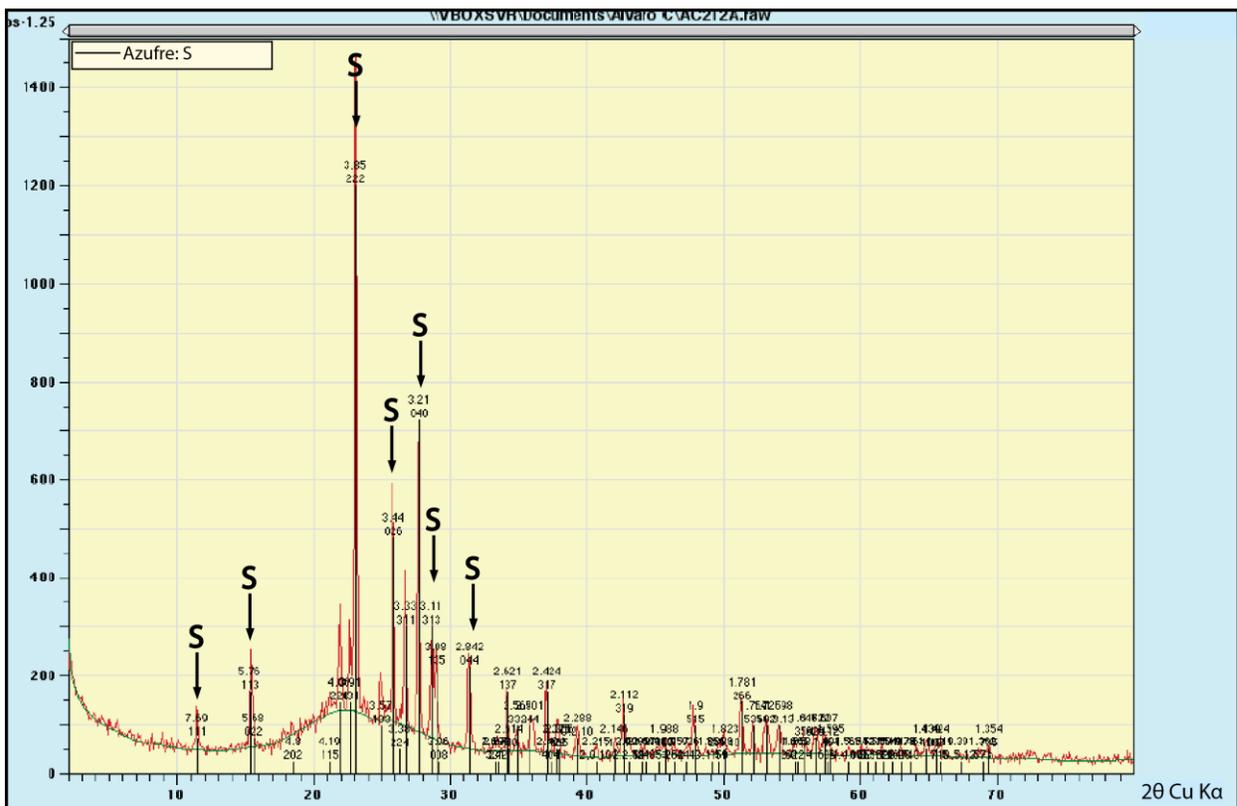
Muestra:	OXB2	Textura:	porfírica; parcialmente obliterada.
Tipo de Roca:	volcánica (lava)	Estructura:	<i>boxwork</i> con hematita
Mineral alteración:	de	Ocurrencia:	
cuarzo (50%)			como reemplazo de la masa fundamental en agregados cristalinos masivos.
sericita (35%)			como producto de alteración de feldespatos y de la masa fundamental en agregados micáceos cumulíticos.
caolinita (10%)			como alteración superficial en agregados terrosos, junto con goethita y hematita.
hematita (2%)			como relleno en estructura <i>boxwork</i> en agregados cristalinos de grano fino, y en pátinas de alteración superficial.
goethita (3%)			como pátina de alteración superficial.

Anexo C: Resultados de DRX

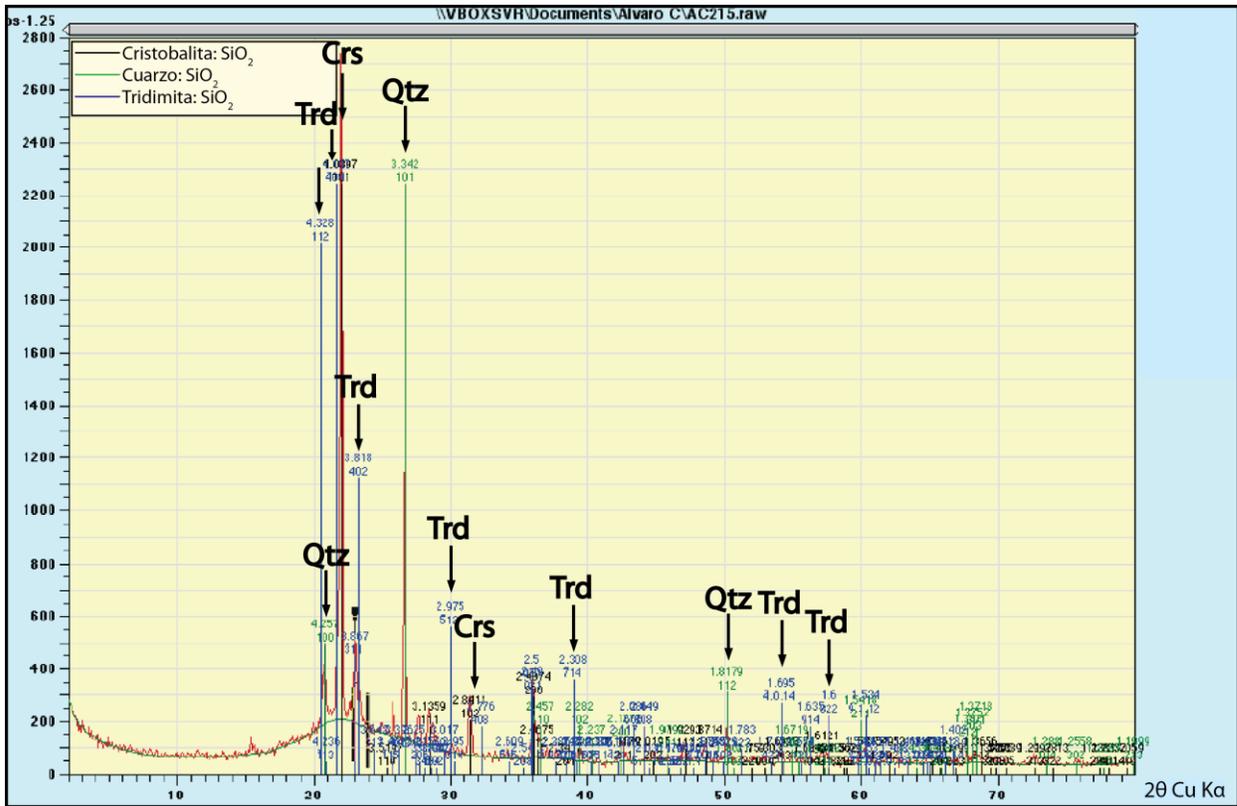
Muestra: 1.2.3.A



Muestra: 2.1.2.A



Muestra: 2.1.5



Muestra: 3.2.1.B

